



Osaamista
ja oivallusta
tulevaisuuden
tekemiseen

Teemu Kinnunen

Sähkön laadun taloudellinen merkitys konesaliympäristössä

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Sähkö- ja automaatiotekniikan tutkinto-ohjelma

Insinöörityö

20.5.2019

Tekijä Otsikko	Teemu Kinnunen Sähkön laadun taloudellinen merkitys konesaliympäristössä
Sivumäärä Aika	62 sivua + 2 liitettä 20.5.2019
Tutkinto	Insinööri (AMK)
Tutkinto-ohjelma	Sähkö- ja automaatiotekniikan tutkinto-ohjelma
Ammatillinen pääaine	Sähkövoimatekniikka
Ohjaajat	Sähkölaitteiston käytön johtaja Ari Kokkonen Lehtori Sampsa Kupari
<p>Opinnäytetyössä tutkittiin sähkön laatua konesalin sähköjärjestelmässä ja sen taloudellista merkitystä. Työn tarkoituksena oli antaa yritykselle tietoa tutkitusta konesalin sähkön laadusta sekä antaa arvioita sen taloudellisista vaikutuksista sähkölaitteiston asennus- ja käyttövaiheessa. Työssä tutustuttiin sähkön laatuun käsitteenä ja kerrottiin erilaisista laitteista, joita konesaleissa käytetään. Tutkittavasta konesalista mitattiin sähkön laatua eri pisteistä ja kuvattiin sähköjärjestelmän rakennetta.</p> <p>Mittaustulosten perusteella luotiin arvioita sähkön laadun taloudellisista vaikutuksista laitevalinnoissa, häviöissä sekä toimintahäiriöissä. Sähkön laadulla on taloudellisia vaikutuksia, jotka näkyvät lisääntyneinä käyttökustannuksina, häviöinä sekä käyttöhäiriöiden aiheuttamina kustannuksina.</p> <p>Opinnäytetyötä voidaan käyttää antamaan lisätietoa sähköjärjestelmän kehittämiseen sekä henkilöstön opetusmateriaalina sähköjärjestelmän laitteiden vaikutuksista sähkön laatuun.</p>	
Avainsanat	sähkön laatu, palvelinkeskus, konesali, kustannukset, mittaus

Author Title	Teemu Kinnunen Economic Effects of Power Quality on Data Centers
Number of Pages Date	62 pages + 2 appendices 20 May 2019
Degree	Bachelor of Engineering
Degree Programme	Electrical and Automation Engineering
Professional Major	Electrical Power Engineering
Instructors	Ari Kokkonen, Operation Manager of an electrical installation Sampsa Kupari, Senior Lecturer
<p>This thesis work studied data center power quality and its economic effects. The purpose for this thesis work was to give more information for the company concerning the examined data center power quality and economic estimations concerning the effects during installations and operating the electrical system. Power quality was measured from various locations in electrical system. The thesis presents the data center electrical devices and system layout.</p> <p>Based on a measurement results, estimations concerning power quality economic effects was given related to device selections, power losses and operating disruptions. Power quality has a economic effect which occurs in increased losses and operating and malfunction costs.</p> <p>This thesis work can be used to give more details for electrical system development and as instructional document for electrical system operating personnel.</p>	
Keywords	power quality, data center, costs, economic, measurements

Sisällys

Lyhenteet

1	Johdanto	1
2	Sähkön laatu	2
2.1	Standardin mukainen sähkön laatu	2
2.2	Suositukset konesalien sähkön laadusta	4
3	Konesali sähkön laadun mittausympäristönä	6
4	Konesalin sähköjärjestelmä	8
4.1	Sähköjärjestelmän kuvaus	8
4.2	Sähkölaitteiston rakenne ja komponentit	10
4.3	Mittauspisteet	12
5	Mittauslaitteet	15
6	Sähkön laatu mittauspisteissä	18
6.1	Mitattavat arvot	18
6.2	A-pääkeskus	20
6.3	B-pääkeskus	28
6.4	UPS-jakokeskus	33
6.5	Ryhmäkeskus IT-1	36
6.6	Ryhmäkeskus IT-2	39
6.7	Ryhmäkeskus-IV	43
6.8	KytKentätilanteet	46
6.9	Varavoiman käyttäminen	48
7	Taloudellinen merkitys	49
7.1	Harmoniset virrat	50
7.2	Johdinhäviöt	52
7.3	Sähköjärjestelmän toimintahäiriöt	56

8	Yhteenveto	59
	Lähteet	61
	Liitteet	
	Liite 1. Johtimien häviölaskenta	
	Liite 2. Jännitehäiriö A-pääkeskuksessa	

Lyhenteet

CSV	Comma-Separated Values. Tiedostomuoto, jolla tallennetaan yksinkertaista taulukkomuotoista tietoa tekstitiedostoon.
EN	European Norms. Euroopan teknisiä standardeja, joita kehittää ja ylläpitää CEN (European Committee for Standardization).
IGBT	Insulated-Gate Bipolar Transistor. Hilalla varustettu bipolaaritransistori. Tehoelektronikan komponentti, jota käytetään esimerkiksi suuntaajakäytöissä.
IT	Informaatioteknologia tai informaatiotekniikka. Tietokoneiden ja digitaalisen tietoliikenteen avulla tehtävää tietojen muokkaamista, tallennusta ja hakua.
RMS	Root Mean Square. Sähköisen suureen, kuten vaihtojännitteen tai vaihtovirran neliöllinen keskiarvo.
SFS	Suomen Standardisoimisliitto SFS ry on Suomen standardisoinnin keskusjärjestö.
STS	Static Transfer Switch. Laite, joka mahdollistaa välittömän vaihtamisen kahden erillisen sähkösyötön välillä.
TCP/IP	Transmission Control Protocol / Internet Protocol. Usean Internet-liikennöinnissä käytettävän tietoliikenneprotokollan yhdistelmä.
UPS	Uninterruptible Power Supply. Järjestelmä tai laite, jonka tehtävä on taata tasainen virransyöttö lyhyissä katkoksissa ja syöttöjännitteen häiriöissä.

1 Johdanto

Perinteisesti sähköjärjestelmien tarkoitus on tuottaa sähköenergiaa ja siirtää tuotettu energia käyttäjälle soveltuvalla jännitteellä. Useimmiten kustannuksien pitäminen kohtuullisina toimii rajoitteena erilaisille teknisille ratkaisuille. Laitteisiin tehtävien investointien optimointi tarkoittaa luotettavuuden ja hinnan välistä kompromissia. [1, s. 1.]

Konesalien tietojen käsittelyyn valjastetut laitteet kuluttavat sähköä ja isojen konesalien sähköteho voi olla useita megawatteja. Tietojen käsittelyyn, sähköjärjestelmän varmentamiseen tai muihin konesalin toimintoihin tarkoitetut laitteet voivat vaikuttaa huomattavasti sähkön laatuun. Huono sähkön laatu vaikuttaa laitteiston rakentamisen ja ylläpidon kustannuksiin ja altistaa laitteet erilaisille häiriöille. Huonolla sähkön laadulla on vaikutusta myös sähköjärjestelmien hyötysuhteeseen. [2, s. 4; 3, s. 22.]

Opinnäytetyö tehdään tietoliikennealan yritykselle, joka tarjoaa maailmanlaajuisesti yksityis- ja yritysasiakkaille korkealaatuisia konesalipalveluita. Tutkittava konesali sijaitsee Tuusulassa, yhtiön rakenteilla olevassa konesalipuistossa. Työssä keskitytään yksittäisen konesalin pienjännitejakelun sähkön laatuun. Yhtiöllä ei ole käytettävissään yhteistä dokumenttia, jossa olisi koottuna pienjännitejakelun tärkeimmät sähkön laadun mittaustulokset ja päätelmät. Opinnäytetyön tavoitteena on antaa yritykselle mittaustuloksia sähköjärjestelmän sähkön laadusta ja arvioita sen taloudellisesta merkityksestä.

Työssä tutkitaan sähköjärjestelmän sähkön laatua ja sen taloudellista merkitystä. Konesalien sähkön laadulle asetetaan usein korkeita vaatimuksia, esimerkiksi sähkön syötön stabiilisuus ja turvattu jatkuvuus ovat tärkeitä tietojen käsittely laitteiden moitteettoman toiminnan kannalta. Työssä selvitetään sähkön laadun käsitteitä ja minkälaisia vaatimuksia sille asetetaan konesaleissa. Sähkölaitteiston rakennetta ja komponentteja esitellään, jotta saadaan riittävä kuvaus konesalin sähköjärjestelmästä, jossa sähkön laadun mittauksia tehdään.

Mittaustuloksien pohjalta laaditaan arvioita ja laskelmia taloudellisesta merkityksestä. Opinnäytetyöstä saatuja tietoja voidaan hyödyntää sähköjärjestelmän suunnittelussa, käytön optimoinnissa ja henkilöstön kouluttamisessa.

2 Sähkön laatu

Terminä sähkön laatu tarkoittaa joukkoa erilaisia vaatimuksia sähkön ominaisuuksille, jotka sallivat sähkölaitteiden toimia ilman merkittävää suorituskyvyn tai eliniän laske- mista. Riittämättömällä sähkön laadulla syötettävä laite ei välttämättä toimi kunnolla ja sen toiminta voi vaarantua tai estyä kokonaan. Suuri osa laitteiden toimintahäiriöistä joh- tuu hetkellisistä sähkön laadun häiriöistä. Yleisesti sähkölaitteet on suunniteltu toimi- maan sinimuotoisella jännitteellä ja yhä useammat niistä vaativat virheetöntä jännitettä toimiakseen tarkoitetulla tavalla. Liityntäpisteille toimitetulla sähköllä on ominaisuuksia, jotka muuttuvat ja vaikuttavat sähköstä saatuun hyötyyn käyttökohteessa. Sähkön käyt- täminen käyttökohteessa on yksi ominaisuuksiin vaikuttava päätekijä. [4, s.12; 3, s. 3; 5, s. 52.]

Sähkön laadun merkittävämpiä vaatimuksia laitteiden toiminnalle ovat käyttökeskeytyk- sien, ali- sekä ylijännitteen, harmonisten yliaaltojen, jännitteen vaihtelun, jännite epäsym- metrian ja transienttien hallinta [6, s.11]. Häiriöt syöttävässä verkossa heikentävät säh- kön laatua, joka voi aiheuttaa laitteiston toimintahäiriöiden myötä taloudellista menetystä käyttökohteessa [4, s.2]. Tästä syystä sähkön laadun arviointi ja sen hyödyllisyys koros- tuu prosesseissa, joissa katkottoman toiminnan turvaaminen on tärkeää.

2.1 Standardin mukainen sähkön laatu

Sähkön laatua määrittelevä standardi SFS-EN 50160 antaa raja-arvoja liityntäpisteen jännitteen laadulle. Standardin tärkeimpiä määritelmiä sähköverkkoon liittyjän kannalta ovat sopimuksen mukainen jakelujännite U_c ja sen taajuus. Sovittujen jännitteen arvojen perusteella voidaan määrittää joukko erilaisia raja-arvoja sähkön laadulle. Erilaiset pien- jänniteverkon häiriöt ja poikkeamat jaetaan standardissa yksinkertaistetusti kahteen eril- liseen luokkaan [5, s. 18], joita ovat

- jatkuvat ilmiöt eli nimellisarvon poikkeamat, jotka esiintyvät toistuvasti
- jännitehäiriöt, jossa jännitteen käyrämuodon äkilliset ja merkittävät muu- tokset poikkeavat tavoitellusta tai tavallisista käyrämuodoista.

Standardi määrittää joillekin jatkuville ilmiöille raja-arvoja sekä viitteellisiä suositusarvoja.

Taajuuden keskiarvon raja-arvot yhteiskäyttöverkoissa ovat 10 sekunnin ajanjaksolla mitattuna 47-52 hertsiä. Taajuuden vaihtelun tulee olla välillä 49,5–50,5 hertsiä 99,5 prosenttia ajasta, vuoden mittaisella seurantajaksoilla. Seurannasta vastaa normaalisti verkkoalueen operaattori [5, s. 20].

Jännitetason vaihtelut eivät saisi ylittää ± 10 prosenttia verkon nimellisjännitteestä U_n , normaalien käyttöolosuhteiden vallitessa, pois lukien keskeytysjaksot. Seuranta tehdään viikon pituisten mittausjaksojen, mitatuista jakelujännitteen tehollisarvojen 10 minuutin keskiarvoista. Mittausjakson kaikkien arvojen tulee olla $+10\%$ / -15% jakelujännitteen arvoista U_n . Viikon mittaisilla mittausjaksoilla 10 minuutin keskiarvot tulee olla 95 prosenttia ajasta vaihteluvälillä $U_n \pm 10$ prosenttia. Annetut arvot eivät ole voimassa esimerkiksi erillisverkoissa. Pienjänniteverkon nimellisjännite U_n on vaiheen ja nollan välillä mitattuna 230 voltia. Sopimuksen mukainen jakelujännite U_c on useimmiten U_n . Jännitehäiriöille on annettu suuntaa-antavia arvoja. Standardi kuvaa yksittäisiä nopeita jännitemuutoksia. Jakelujännitteen epäsymmetria tulee kunkin viikon pituisen mittausjakson aikana jokaisen vastakomponentin 10 minuutin tehollisarvon keskiarvoista 95 % olla välillä 0–2 prosenttia perustaajuisesta myötäkomponentista. [5, s. 8, 20, 22.]

Harmonisen yliaaltojännitteen mittaukset tapahtuvat normaaleissa käyttöolosuhteissa viikon pituisilla mittausjaksoilla, joissa yksittäisiä harmonisia yliaaltojännitteitä verrataan perustaajuisen jakelujännitteen tehollisarvoon 10 minuutin keskiarvoilla. Taulukossa 1 on esitetty yliaaltojännitteiden sallitut raja-arvot järjestysluvultaan 25:een saakka.

Taulukko 1. Harmonisten yliaaltojännitteiden sallitut raja-arvot liittymiskohdissa [5, s. 22].

Parittomat yliaallot				Parilliset yliaallot	
Kolmella jaottomat		Kolmella jaolliset			
Järjestysluku h	Suhteellinen jännite U_h	Järjestysluku h	Suhteellinen jännite U_h	Järjestysluku h	Suhteellinen jännite U_h
5	6,0 %	3	5,0 %	2	2,0 %
7	5,0 %	9	1,5 %	4	1,0 %
11	3,5 %	15	0,5 %	6–24	0,5 %
13	3,0 %	21	0,5 %		
17	2,0 %				
19	1,5 %				
23	1,5 %				
25	1,5 %				

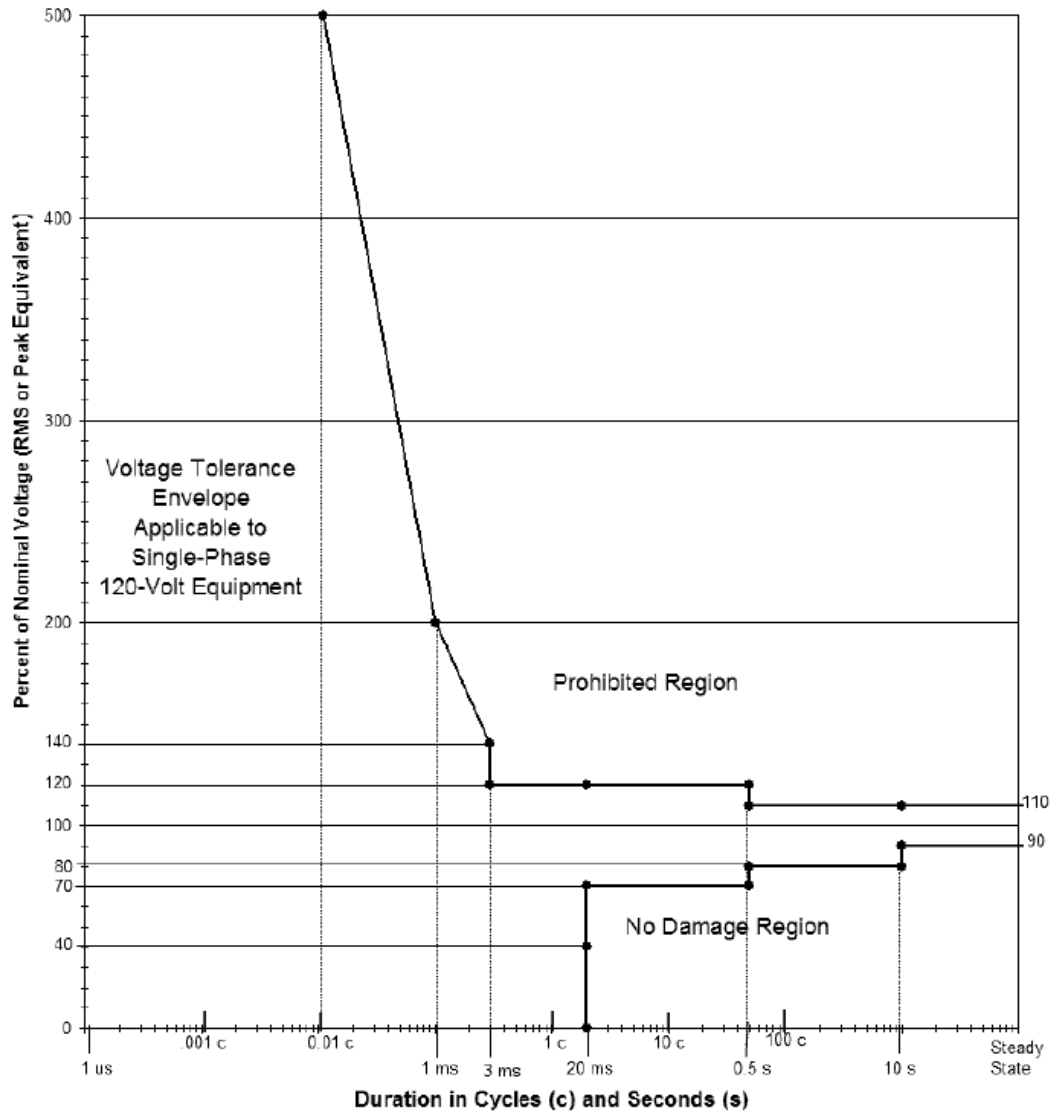
Kokonaissärökerroin THD tulee olla liittymiskohdassa joko kahdeksan prosenttia tai pienempi. Kertoimen laskentaan käytetään kaikkia harmonisia yliaaltojännitteitä järjestysluokun 40 saakka. [5, s. 22.]

Jännitekuoppien arviointiin standardi antaa suosituksena havahtumistasoksi 90 prosenttia nimellisjännitteestä ja ylijännitteiden osalta 110 prosenttia nimellisjännitteestä. Transienttiylijännitteiltä suojautumiseen ohjeistetaan tarvittaessa standardin IEC 60364-5-53 mukaisesti valituilla ylijännitesuojilla. [5, s. 26.]

2.2 Suositukset konesalien sähkön laadusta

Konesalit asettavat sähkön laadulle omat erityistarpeensa. Standardin SFS-EN 50160 mukaista sähkön laatua ei sovelleta esimerkiksi sähköverkkojen huolto- tai vikatilanteissa, jolloin sähkönsyöttö kuluttajalle voi olla katkaistuna. Standardi voidaan korvata osittain tai kokonaan jakeluoperaattorin ja käyttäjän välisellä sopimuksella [5, s. 6]. Sähkön tarve on konesalien liiketoiminnan ylläpitämisen vuoksi jatkuvaa, joten useimmiten tärkeää IT-laitteistoa ei voida syöttää suoraan varmentamattomana jakeluverkosta.

Kuvassa 1 on esitetty 120 V/60 Hz -vaihtosähköverkossa toimivien yksivaiheisesti liitettyjen tietoliikennelaitteiden asettamille jännitteen vaatimuksille arvioituja raja-arvoja. Kuvaaja on ITIC (CBEMA) -järjestön julkaisema viitteellinen käyrästä, josta voidaan arvioida tietotekniikan laitteiden sietokykyä erilaisia jännitteen muutoksia vastaan. Kuvaaja on kehitetty ennen maailmanlaajuisesti saatavilla olevia valmiita tietokoneiden virtalähteitä. Kuvaajan iästä huolimatta, se on ainoa valmistajien yhteisesti hyväksymä IT-laitteiden virtalähteiden vaatimuksia koskeva määrittely. [2, s. 505.]



Kuva 1. ITIC (CBEMA)-järjestön kuvaaja palvelimen jännitetason vaatimuksille [7, s. 1].

Kuvasta 1 voidaan havaita, että ylijännitteiden osalta

- 120 prosenttia nimellisjännitteestä oleva tehollisarvoinen jännite vaarantaa palvelimien toimintaa keston ollessa yli kolme millisekuntia
- hetkellisen 200 prosenttisen ylijännitteen sietokyky on yksi millisekunti.

Alijännitteen siedolle laitteet asettavat rajan 70 prosenttia nimellisjännitteestä, keston ollessa yli 20 millisekuntia. Hetkellistä jännitekatkoa laitteet kestävät 20 millisekunnin ajan, joka 50 hertsin taajuudella tarkoittaa yhtä vaihtosähkön jakson pituutta. Esimerkkinä

sähkön laatu standardi SFS-EN 50160 sallii jännitteen olevan 10 minuutin jaksolla 85 prosenttia nimellisjännitteestä [5, s. 20]. Kuvasta 1 voidaan havaita, että alle 90 prosentin jännitetaso voi aiheuttaa ongelmia IT-laitteen toiminnalle keston ollessa yli 10 sekuntia.

Suosituksien mukaan suositukset konesalin sähkön laadulle määrittää sähköjärjestelmän komponentit ja kuormana toimivat tietotekniikan laitteet. Yksiselitteisiä raja-arvoja konesalien sähkön laadulle on vaikea antaa. Sähkön laadun vaatimukset tulisi arvioida jokaisessa konesalissa erikseen, huomioiden yrityskohtaiset vaatimukset tiedonkäsittelyn jatkuvuudelle erilaisilla häiriötilanteissa. Kohdekohtainen määrittely on tärkeää, sillä usein sähköjärjestelmän varmennukseen liittyvät laitteet tulee asettaa toimimaan oikein. Aseteltavia arvoja ovat esimerkiksi staattisen vaihtokytkimen jännite- ja taajuustoleranssit, joilla vaihtotoiminto syöttöjen välillä tulee tapahtua tai olla estettynä. Toisena esimerkkinä on, että milloisissa tilanteissa syötönvaihtoja voidaan tehdä, jos eri pisteistä staattiselle vaihtokytkimelle tulevat syötöt eivät ole keskenään saman taajuisia tai vaihekulmaisia [8, s.5]. Vastaavat toiminnan määrittelyt koskevat useita muitakin konesaleissa yleisesti käytettäviä laitteita.

Konesalit asettavat erityisiä vaatimuksia sähkön laadulle ja sen ylläpitämiselle riittävällä tasolla. Sähkön laadun vaatimuksia määrittää kohdekohtainen häiriöiden tai jännitekatkojen salliminen [2, s. 217]. Konesalin toiminnan salliessa pitkä- tai lyhytjaksoisia sähkökatkoja voidaan sähköjärjestelmän komponentit ja laitteet valita sen mukaisesti. Toiminnan vaatiessa korkeampaa sähkön laatua, jossa katkoja ei normaalitilanteissa voida sallia, tulee sähköjärjestelmää varmentaa soveltuvilla ratkaisuilla ja siten saavuttaa haluttu taso sähkön laadulle.

3 Konesali sähkön laadun mittausympäristönä

Tyypillisessä konesalissa sähköenergiaa käytetään informaatioteknologian ja sitä tukevien laitteiden toimintaan [2, s.3]. Yleensä konesaleissa suurin osa kulutetusta sähköstä kuluu tietojen käsittelyyn ja sen siirtämiseen, pienempi osa sähkön kokonaiskulutuksesta kuluu tukevien toimintojen ylläpitämiseen. Konesalien tietojenkäsittelyn pääroolissa ovat erilaiset palvelimet, tietojen varastointiin tarkoitetut laitteet ja yhteyksien luontiin

tarkoitettut verkkolaitteet. Tietojenkäsittelyn tukevia järjestelmiä ovat sähkönsyötön laitteet, jäähdytyslaitteet, valaistus ja muut kiinteistötekniikan sähkölaitteet.

Tietojenkäsittely voi tänä päivänä liittyä lähes tulkoon minkä tahansa asian prosessointiin. Tietojenkäsittely on iso osa maailmanlaajuista taloutta ja tiedon määrä kasvaa jatkuvasti. Konesalien toiminta liittyy jokapäiväiseen elämään. Käsiteltävää tietoa syntyy päivittäin erilaisissa tapahtumissa, kuten maksukorttitapahtumissa, internetin selailussa, matkapuhelimien käytössä, sosiaalisessa mediassa ja laskentatehoa vaativissa prosesseissa. Tietojenkäsittely tapahtuu yleensä jonkin sitä varten valjastetun laitteen suorittamana. Laskenta, tiedon tallentaminen tai tietoliikenteen reitittäminen oikeaan osoitteeseen kuluttaa sähköä. Informaatioteknologian laitteissa kulutettu sähköenergia tuottaa saman suuruisen määrän lämpötehoa, ja siten laitteita on usein tarpeen jäähdyttää [2, s. 4].

Sähköteho konesaleissa voi suuruusluokaltaan vaihdella muutamasta kilowatista aina useaan megawattiin. Huolimatta konesalin sähkötehosta tai käyttötarkoituksesta, kaikki konesalit kuluttavat sähköä palvellakseen tietojen käsittelyä. Tyypillisessä palvelimessa noin 30 prosenttia sähkötehosta kuluu prosessorin toimintaan ja loput 70 prosenttia kuluu oheislaitteiden toimintaan. Palvelimen oheislaitteita ovat esimerkiksi virtalähde, muisti, puhaltimet, levyasema ja muut vastaavat komponentit. Keskimäärin yksittäisen palvelimen hyötysuhde voi olla jopa alle 20 prosenttia kulutetusta kokonaistehosta. Konesalin palvelimet, reitittimet ja muut tietotekniikan laitteet ottavat yleensä vaihtosähköverkosta epälineaarista virtaa. [2, s. 4; 9, s. 8.]

Konesalien IT-laitteiden ottama virta on epälineaarista ja niiden käynnistysvirrat ovat yleensä suuria verrattuna nimellisvirtoihin. IT-laitteet asettavat kuitenkin korkeat vaatimukset käyttämälleen sähkölle. Laitteiden sisäiset komponentit käyttävät tasasähköä, joka saadaan useimmiten vaihtosähköverkosta syötetystä hakkuriteholähteestä. Tasa-suuntauksesta johtuen vaihtovirran aaltomuoto ei ole sinimuotoista. Hakkuriteholähteen ottama virta on epälineaarista ja harmonisia komponentteja sisältävää. Virrasta vain osa on virran perusaaltoa. [3, s.11.]

4 Konesalin sähköjärjestelmä

4.1 Sähköjärjestelmän kuvaus

Konesalien sähkölaitteisto on useimmiten rakennettu varmennetuksi sähköjärjestelmäksi. Erilaiset huolto- ja vikatilanteet sähköjärjestelmän komponenteissa eivät normaalisti aiheuta jännitekatkoja tärkeille kuormille, vaan syötöille on vaihtoehtoisia reittejä tai lähteitä. Varmentaminen ja katkeamaton sähkönsyöttö on tehty konesalin ydintoimintojen jatkuvuutta ajatellen. Ydintoimintoja ovat esimerkiksi asiakkaiden tietoliikenne ja siihen kuuluvien laitteiden jäähdytys. Muut sähköjärjestelmät, kuten kiinteistön kuluttajille tarkoitetut sähköpisteet, ovat pääsääntöisesti varmentamattomia. Sähköjärjestelmän varmentamisella saavutetaan usein korkeampi käytettävyys, haittapuolena on järjestelmän monimutkaistuminen ja korkeammat kustannukset rakentamisen sekä myöhemmin huoltojen yhteydessä.

UPS-järjestelmä (Uninterruptible Power Supply) on tärkeä osa sähköjärjestelmää kohteissa, joissa korkea käytettävyys ja hyvä sähkön laatu on tärkeää. UPS-järjestelmä on eräs energiavarastojen sovelluskohde sähkön jakelun luotettavuuden ja laadun hallinnassa. Tyypillisesti järjestelmä syöttää sähköä verkkokatkon yhteydessä niin pitkään, kunnes konesalin tietoliikenne saadaan ajettua hallitusti alas tai jokin vaihtoehtoinen syöttöjärjestelmä käynnistyy. Tyypillinen varasyöttö verkkosyötölle on varavoimakoneelta. [2, s. 495; 6, s. 45.] UPS-järjestelmät jaetaan kahteen eri luokkaan [2, s. 496], jotka ovat

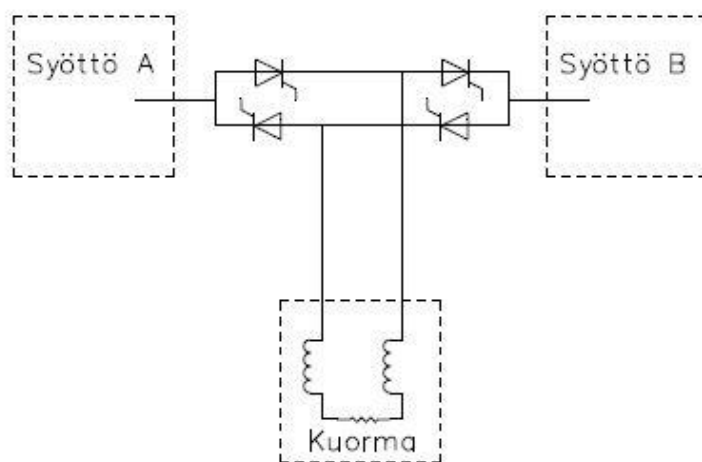
- staattinen UPS-järjestelmä, jossa energiavarastona toimii akusto
- dynaaminen UPS-järjestelmä, jossa energiavarastona toimii esimerkiksi pyörivä massa.

UPS-järjestelmien kuormina konesaleissa on yleensä erilaiset tärkeät tietotekniikan laitteet, joiden toimintaa halutaan suojata erilaisilta sähkön laadun häiriöiltä [2, 495].

Varavoimakoneen tarkoituksena on tuottaa konesalille sähköä tilanteissa, joissa verkkosyöttö ei ole jostain syystä käytettävissä. Varavoimakoneen generaattorin pyörittämiseen tarvittava energia voi tulla esimerkiksi tuulesta, vedestä, polttokennosta, kaasuturbiinista tai polttomoottorista. Varavoimakoneen käynnistyminen ja valmius tehon

syöttämiseen on useimmiten nopeaa. Esimerkiksi käynnistymishetkestä generaattorin täyteen tehoon voi kulua alle 30 sekuntia. Useimmissa konesaleissa käytetty varavoimakone on tyypiltään dieselgeneraattori. [2, s. 512–513, 525.]

Staattinen vaihtokytkin eli STS (Static Transfer Switch) on laite, jota käytetään syöttölinjan vaihtamiseen esimerkiksi varmennetuissa järjestelmissä [6, s. 49]. Laitteelle tulevat syötöt eivät ole keskenään yhteydessä. Vaihto syöttöjen välillä on toteutettu tehoelektronikalla järjestetyllä lyhyellä katkolla molemmissa syötöissä [2, 497]. Kuvassa 2 on esitetty yksinkertaistettu staattinen vaihtokytkin.



Kuva 2. Staattinen vaihtokytkin (STS) yksinkertaistettuna.

Syöttöjen vaihtotapahtumassa syötöt ovat hetken aikaa pois päältä, jolloin eri syötöt eivät kytkeydy toisiinsa. Vaihtotapahtuma kestää yleensä muutamia millisekunteja. Vaihtotapahtuman keston vaikuttaa esimerkiksi kytketyn kuorman tehokerroin. [6, s. 49; 11, s. 49.]

Konesalit luokitellaan usein sähkönsyötön kannalta tärkeiksi kohteiksi, tällöin on perusteltua varmentaa sähkölaitteistoa. Varmentamisella saavutetut hyödyt ovat korkeammat kuin mahdollisesti häiriöistä aiheutuvat haitat. Käytännössä paikallisen sähköjärjestelmän varmuutta pystytään nostamaan esimerkiksi lisäämällä rinnakkaisten komponenttien tai syöttöjen määrää tai parantamalla järjestelmän suojausta vaikkapa ilkkivaltaa

vastaan. Konesalien liiketoimintaa voidaan varmentaa myös hajauttamalla toimintaa maantieteellisesti eri sijainteihin.

Useimpien konesalien tulee toimia vuoden jokaisena hetkenä. Jatkuva käyttötarve asettaa korkeat vaatimukset huoltojen organisoinnin, vikojen korjauksen ja toiminnan jatkumisen kannalta, jolloin laitteiden valintaan ja järjestelmien suunnitteluun sekä ylläpitämiseen tulee käyttää aikaa ja tarkkaavaisuutta. [2, s. 15.]

Varmennettua sähköjärjestelmää kutsutaan usein redundanttiseksi järjestelmäksi. Erilaisia redundanttisuus luokitteluja [2, s. 218] voidaan kuvata esimerkiksi seuraavalla tavalla:

- N: toimintaan tarvittava määrä
- N+1 redundanssi: yksi ylimääräinen yksikkö, moduuli, reitti tai järjestelmä tarvittavan määrän lisäksi
- 2N redundanssi: kaksi erillistä yksikköä, moduulia, reittiä tai järjestelmää.

Redundanssi tarkoittaa esimerkiksi työaseman kahta näyttöä, joilla operaattori pystyy tehokkaasti työskentelemään, mutta tarvittaessa pärjää yhdelläkin näytöllä. Tämän kaltaisen järjestelmä on N+1 -redundantti, jossa toinen näyttö muodostaa tarvittavan määrän rinnalle yhden ylimääräisen, joka voi kuitenkin normaalisti osallistua työn suorittamiseen, muttei kuitenkaan ole välttämätön sen onnistumiselle.

Toisena esimerkkinä ovat konesalin kahdeksantoista ilmakojeita, jotka jäähdyttävät palvelintilaa. Kojeeet muodostavat kaksi toisistaan erillistä jäähdytysjärjestelmää. Ilmakojeista yhdeksän voi olla pois käytöstä vian tai huollon vuoksi, ja tästä huolimatta käytävissä olevat ilmakojeet pystyvät jäähdyttämään palvelintilan täyttä lämpökuormaa. Kuvattu järjestelmä on 2N -redundantti.

4.2 Sähkölaitteiston rakenne ja komponentit

Sähkön laadun mittausten kohteena olevan yksittäisen konesalin sähkölaitteiston pääkeskukset koostuvat kahdesta erillisestä jakelumuuntajasta sekä pääkeskuksesta, joiden nimitys on A- ja B-pääkeskus. Sähkölaitteisto jakaantuu pääkeskusten osalta kahteen erilliseen syöttölinjaan. A-pääkeskus on varmennettu varavoimakoneella.

Tärkein A-pääkeskukseen kytketty kuorma on UPS-laitteisto, jonka tehtävänä on tarjota katkeamatonta sähkönsyöttöä erilliselle UPS-jakokeskukselle. Lisäksi A-pääkeskuksesta on kaapeloitu varasyöttöjä laitteille ja muille keskuksille.

B-pääkeskus syöttää ensisijaisesti konesalin jäähdytykseen liittyviä IV-ryhmäkeskuksia ja RK-1:tä, joka on kiinteistötekniikan ryhmäkeskus. B-pääkeskuksesta on kaapeloitu varasyöttöjä laitteille ja muille keskuksille.

UPS-jakokeskus ja B-pääkeskus syöttävät rinnakkain erillisiä IT-ryhmäkeskuksia, joihin on kytketty palvelinkuormaa. IT-ryhmäkeskusten pääkytkiminä toimii staattinen vaihtokytkin, jonka avulla syöttöä pystytään vaihtamaan kahden eri syöttölinjan välillä ilman merkittävää jännitekatkoa tärkeälle kuormalle.

Pääkeskukset on yhdistetty toisiinsa huoltoyhteydellä ja niitä voidaan syöttää erikseen, yhdellä muuntajalla tai kahdella rinnan kytketyllä muuntajalla. UPS-jakokeskuksen ja A-pääkeskuksen välillä on huoltoyhteys, jolla UPS-laitteisto voidaan ohittaa esimerkiksi laajan vian tai huollon ajaksi.

Molempien pääkeskusten jakelumuuntajat ovat samanlaisia. Muuntajien kilpiarvot ovat

- Sn: 1,6 MVA
- Uk: 6 %
- Un: 20/0,4 kV
- kytkentätunnus: Dyn11.

Muuntajat ovat rakenteeltaan valuhartsilla eristettyjä kuivamuuntajia ja ne ovat varustettu jäähdytyspuhaltimin. Valmistajan mukaan kuormitusta voidaan lisätä arvoon 2,25 MVA, jos muuntajia jäähdytetään ja varmistetaan käämien riittävän alhainen lämpötila. Muuntajien harmonisten yliaaltovirtojen kuormitettavuutta kuvaava kerroin-K on 13 [10, s. 1]. Konesalin muuntajat ovat mittatilaustuotteita ja niiden teknisessä määrittelyssä sekä toteutuksessa on huomioitu asennusympäristö ja kytkettävien kuormien luonteet. Muuntajien kytkentä pääkeskuksiin tapahtuu rinnakkaisten yksijohdinkaapelien avulla.

Kohteeseen asennettu UPS-järjestelmä koostuu kolmesta rinnan kytketystä 600 kVA:n moduulista. Laitteen normaali toiminta perustuu kaksoismuunnostekniikkaan, jossa

laitteeseen syötettävä vaihtojännite ensin tasasuunnataan ja sitten vaihtosuunnataan kuormalle. Laitteisto on tyypiltään online-järjestelmä. Kaksoismuunnostekniikkaa hyödyntäessä saavutetaan lähtöjännitteen ohjattavuus ja hyvä suodatus verkkojännitteen häiriöille. Haittapuolena kaksoismuunnostekniikassa ovat lisääntyneet järjestelmän tehohäviöt sekä syöttöverkkoon muodostuvat harmoniset yliaallot, jotka aiheutuvat tasasuuntauksesta [6, s. 45].

UPS-moduulien tasasuuntauksen välipiireihin on kytketty erillisiä akustoja, jotka syöttävät järjestelmälle virtaa verkkohäiriössä. Normaalisissa käyttötilanteissa UPS-järjestelmä lataa ja ylläpitää akustojen varausta. Akustoja tarvitaan verkkohäiriön aikana, kunnes erillinen varavoimakone kytkeytyy ja UPS-järjestelmä voi palautua normaaliin käyttötilaansa. [6, s. 45.]

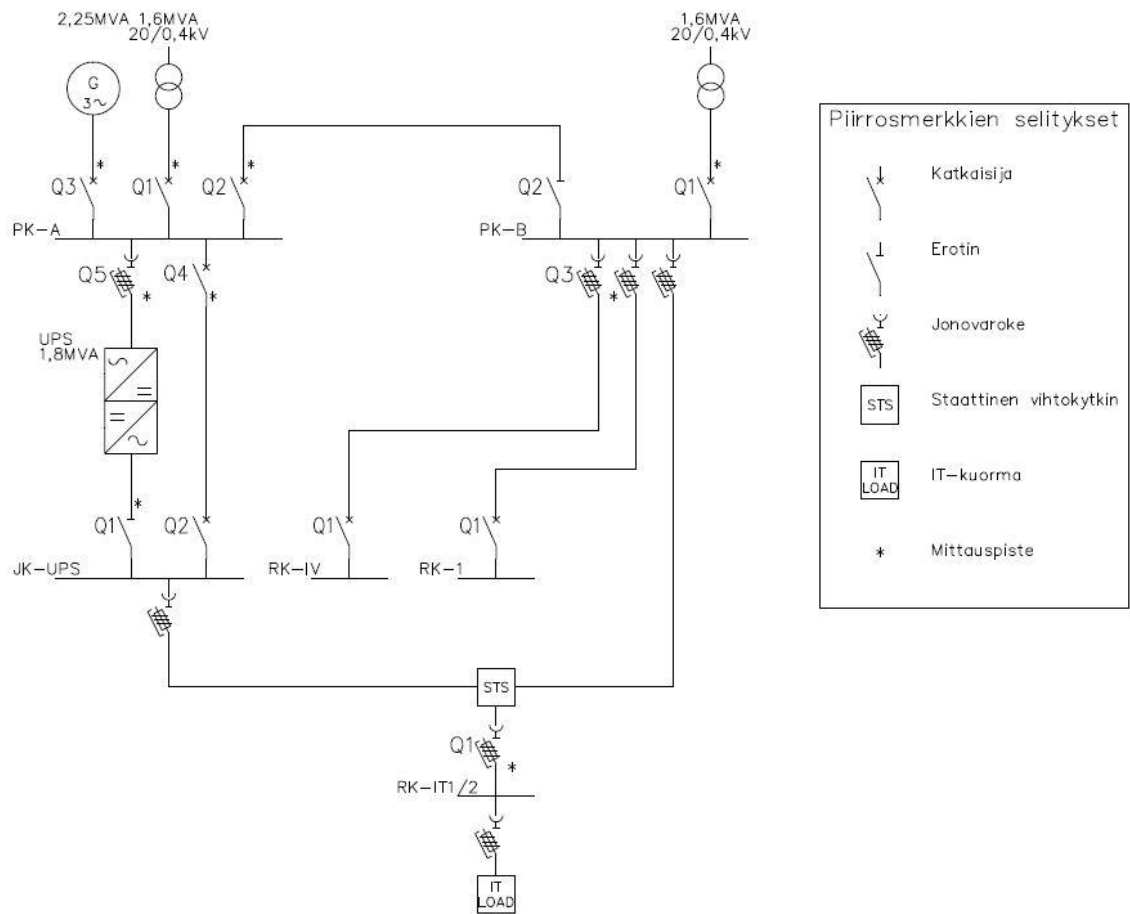
Varavoimakoneena toimii dieselkäyttöinen generaattori. Varavoimakone on asennettu erilliseen tilaan ja sijaitsee konesalin ulkopuolella. Sähkönsyöttö generaattorin ja A-pääkeskuksen välille on tehty rinnakkaisilla yksijohdinkaapeleilla. Varavoimakone tarkkailee normaalitilanteessa A-pääkeskuksen muuntajasyötön jännitettä ja käynnistyy automaattisesti jännitehäiriön yhteydessä. Varavoimakone ohjaa itsenäisesti A-pääkeskuksen katkaisijoita aseteltujen parametrien mukaisesti.

4.3 Mittauspisteet

Tutkittavan konesalin mittauksissa keskitytään pienjännitejakelun eri pisteisiin. Muuntajien mittaus tapahtuu molemmissa pääkeskuksissa muuntajan syöttökennosta. Virtamuuntajat sekä jännitemittaus on kytketty pääkatkaisijan tulopuolelle, joten esimerkiksi jännitteen ja taajuuden mittaus muuntajalta on mahdollista keskuksen pääkatkaisijan ollessa auki. A-pääkeskuksessa työssä hyödynnettäviä mittauspisteitä on yhteensä viisi ja B-pääkeskuksessa kaksi kappaletta.

Keskuksien katkaisijoista ja etukojeista käytetään etutunnusta Q ja sen perässä numeroa. Tunnuksen käyttäminen myös mittauspisteen tunnuksena on luontevaa. Keskuksen katkaisijan tai etukojeen tunnus kohdennetaan mittauspisteeksi lisäämällä siihen keskustunnus. Esimerkiksi PK-A:Q1, joka tarkoittaa A-pääkeskuksen muuntajalta tulevaa syöttökennoa Q1.

Kuvassa 3 on esitetty mitattavan konesalin yksinkertaistettu pääkaavio ja eri mittauspisteet tunnuksineen.



Kuva 3. Konesalin yksinkertaistettu pääkaavio ja piirrosmerkkien selitykset.

Pääkeskuksien muuntaja syöttökennojen mittauspisteet ovat merkitty tunnuksilla Q1. A-pääkeskuksen keskustunnus on PK-A ja B-pääkeskuksen puolestaan PK-B.

Pääkeskuksia yhdistävän huoltoyhteyden mittauspiste on merkitty A-pääkeskukseen tunnuksella Q2. Virtamuuntajat sekä jännitemittaus on kytketty katkaisijan lähtöpuolelle. Kytkentätilanteesta riippuen, mittauksella saadaan mitattua joko A- tai B-pääkeskuksen kiskostossa tai pääkeskuksien yhdistyksessä kulkevan sähköarvoja.

Varavoimakone on liitetty A-pääkeskukseen. Syöttökennon virtamuuntajat ja jännitemittaus on kytketty katkaisijan tulopuolelle. Mittauspisteen tunnus on Q3.

UPS-laitteen ohittava huoltoyhteys on tehty A-pääkeskuksen ja UPS-jakokeskuksen välille. Yhteyden virtamuuntajat ja jännitemittaus on kytketty A-pääkeskuksen katkaisijan lähtöpuolelle. Mittauspisteen tunnus on Q4.

UPS-laitteen mittauspisteenä toimii yhden UPS-moduulin syöttökenno A-pääkeskuksessa. Virtamuuntajat ja jännitemittaus on kytketty etukojeen lähtöpuolelle. Etukojeen ollessa auki näkyy mittauksessa jännitekatko. Mittauspisteen tunnus on Q5.

B-pääkeskuksen syöttämät IV-ryhmäkeskukset ovat mitattavissa. Virtamuuntajat ja jännitemittaus on kytketty etukojeen lähdön puolelle. Mittauksissa keskitytään yhteen lähtöön ja sen mittaustunnus on Q3. B-pääkeskukseen on kytketty ilmanvaihtokojeiden lisäksi myös kiinteistötekniikan laitteita, joiden lähdöt eivät ole erikseen mitattavissa.

UPS-jakokeskuksen syöttöpisteitä UPS-laitteistolta pystytään mittaamaan. Mittauksissa keskitytään saman UPS-moduulin syöttöön, kuin mihin A-pääkeskuksen syöttämä UPS-moduulin mittauskin kohdentuu. Virtamuuntajat ja jännitemittaus on kytketty etukojeen tulopuolelle. Mittauspisteen tunnus on Q1.

Palvelimia ja muita IT-laitteita on kytketty erillisiin IT-ryhmäkeskuksiin, joista mittauksissa keskitytään kahteen erilliseen keskukseseen. Keskuksien tunnukset ovat RK-IT1 ja RK-IT2 ja mittauspisteen tunnus on Q1. Molempien ryhmäkeskusten virtamuuntajat ja jännitemittaus on kytketty keskuksen kiskostoon. Keskuksat saavat syöttönsä ensisijaisesti UPS-jakokeskukselta, mutta niissä on vaihtoehtoinen syöttö myös B-pääkeskukselta. Syöttöjä kuvataan nimityksillä A- ja B-syöttö, joista A-syöttö on ensisijainen.

Konesalin sähköjärjestelmä mahdollistaa monipuoliset kytkentämahdollisuudet ja työssä keskitytään niistä vain muutamaaan. Mitattavia kytkentätilanteita on A-pääkeskuksen syöttäminen varavoimakoneella ja IT-ryhmäkeskuksen syötönvaihto staattisella vaihtokytkimellä.

Normaalitilanteessa pääkeskukset eivät ole yhdistettynä toisiinsa, ilmanvaihtolaitteita syötetään B-pääkeskuksesta ja IT-ryhmäkeskuksia UPS-jakokeskuksesta. Mittauspisteitä PK-A:Q2 ja PK-A:Q4 hyödynnetään historiatietojen osalta analysoitaessa

tapahtuneita kytkentätilanteita. Taulukossa 2 on listattuna konesalin mittauspisteet, joihin työssä keskitytään.

Taulukko 2. Luettelo konesalin mittauspisteistä, tunnuksista ja selostukset normaalitilanteesta.

Keskustunnus	Mittauspiste	Mittaustunnus	Normaalitila	Tarkoitus
PK-A	Q1	PK-A:Q1	kiinni	pääsyöttö
PK-A	Q2	PK-A:Q2	auki	huoltoyhteys
PK-A	Q3	PK-A:Q3	auki	varavoimasyöttö
PK-A	Q4	PK-A:Q4	auki	huoltoyhteys
PK-A	Q5	PK-A:Q5	kiinni	syöttölähtö
PK-B	Q1	PK-B:Q1	kiinni	pääsyöttö
PK-B	Q3	PK-B:Q3	kiinni	syöttölähtö
JK-UPS	Q1	JK-UPS:Q1	kiinni	pääsyöttö 1
RK-IT1	Q1	RK-IT1:Q1	kiinni	syöttö
RK-IT2	Q1	RK-IT2:Q1	kiinni	syöttö

Konesalin sähköjärjestelmän normaalitilanteen ymmärtäminen on tärkeää, sillä esimerkiksi tehoanalyysointien tallentamat häiriöt syöttöjännitteessä on tunnistettava ja eroteltava poikkeavuuksina normaalitilanteesta.

5 Mittauslaitteet

Tutkittavan konesalin sähkön laadun mittauslaitteina toimivat keskuksiin asennetut tehoanalyysointit. Mittauslaitteet on asennettu keskusvalmistajan toimesta ja niiden tarkoituksena on jatkuvasti mitata ja tallentaa sähköisiä arvoja. Asennettujen tehoanalyysointien malli on UMG 604-E PRO ja niiden valmistaja on Saksalainen Janitza Electronics GmbH.

Mittauslaitteet ovat asennettu keskuksien ohjauskennoihin 35 mm:n DIN-kiskokiinnitteisinä. Jännitteen mittaus tapahtuu suoraan keskuksen tai lähdön kiskostosta. Virran mittaus on epäsuora ja siinä hyödynnetään mittamuuntajia. Virran mittamuuntajien ensiökäämityksen nimellisvirta on kohteesta riippuen enimmillään 3200 ampeeria ja toisiokäämityksen nimellisvirta on aina viisi ampeeria. Mittamuuntajien ensiö- ja toisiokäämityksen välinen suhde on valittu mittaustarkoituksien kuormien enimmäisvirtojen mukaisesti.

Asennetut tehoanalyysointit mahdollistavat monipuolisesti sähköisten arvojen mittaukset. Perusominaisuuksina ovat vaihekohtaiset perusmittaukset, joita ovat esimerkiksi

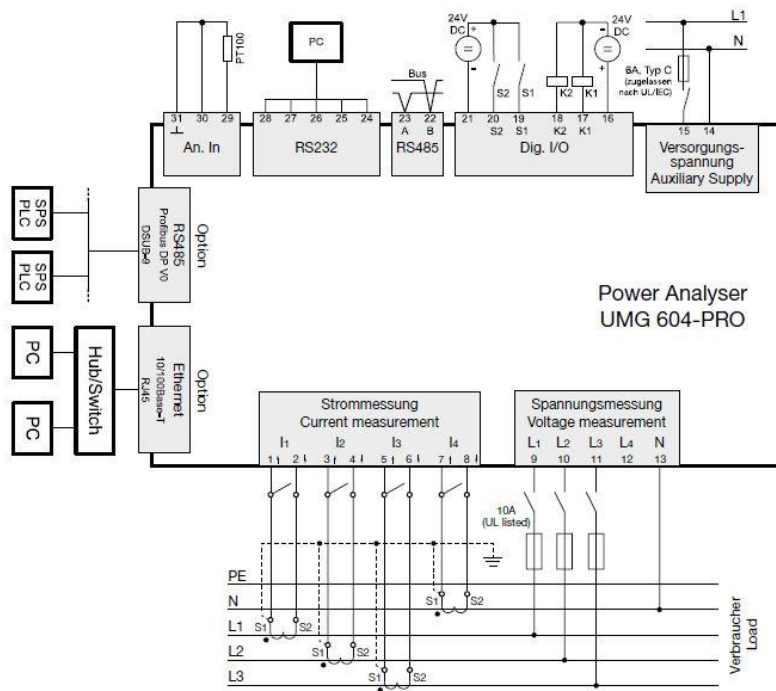
jännite, virta, taajuus, tehokerroin sekä aallonmuoto. Seuraavassa on lueteltu sähkön laadun kannalta merkittävimmät ominaisuudet:

- harmoniset yliaallot järjestyslukuun 40 saakka
- epäsymmetria
- harmoniset kokonaissäröt THD I ja THD U
- lyhytaikaiset jännitehäiriöt >20 ms
- transientit >50 μ s
- käynnistysvirrat >20 ms
- lokitiedoston kerääminen käyttäjän asettelemista tapahtumista ja arvoista.

Mittauslaitteet ovat yhdistetty konesalin sisäiseen lähiverkkoon. Mittaustietoja pystytään lukemaan joko paikallisesti mittauslaitteen näytöltä, selainnäkyellä lähiverkossa tai erillisen käyttöohjelman avulla. Käyttöohjelma on nimeltään Janitza Gridvis, ja sillä saadaan luettua sekä arkistoitua mittauslaitteiden keräämää tietoa. Kommunikointi perustuu jokaiselle mittauslaitteelle annettavaan yksilölliseen internetin protokollaosoitteeseen. Yksilöllisen osoitteen avulla eri mittauslaitteita voidaan kerätä erilliseksi projektiksi Gridvis-ohjelmassa. Yhteys ohjelman ja mittauslaitteen avulla muodostetaan etsimällä ohjelman avulla lähiverkosta TCP/IP-protokollan mukaisia mittauslaitteiden osoitteita. Onnistuneen yhteyden luonnin jälkeen mittauslaitteilta voidaan lukea arkistoitua tietoa sekä tarkastella erilaisia mittausarvoja reaaliaikaisesti. Mittausarvoja voidaan tuoda trendinäytölle, jolloin niiden seuranta on helpompaa. Mitatut arvot voidaan arkistoida ohjelman tietokantaan, tulostaa tai tallentaa CSV-tiedostomuotoon.

Mittauslaitteiden apujännite on syötetty varmennetusta sähkönjakelusta, jolloin mahdollistetaan mittalaitteiden keräämien häiriöiden tallentuminen esimerkiksi sähkökatkon tai vakavan jännitehäiriön yhteydessä. Apujännitteenä toimii 230 voltin vaihtovirtajännite, jota syötetään UPS-jakokeskuksesta. Mittauslaitteiden apujännite voi olla 95–240 voltia vaihtosähköä tai 135–340 voltia tasasähköä.

Tehoanalyysointien erilaiset kytkentämahdollisuudet ovat laajat. Laitteet mahdollistavat erilaiset väylätoiminnot, ohjauksien järjestämisen ja lämpötilan mittauksen. Kuvassa 4 on esitetty liitäntöjen mahdollisuudet ja tyypillinen kytkentä. Konesalin mitattavat kohteet ovat TN-S-jakelujärjestelmän mukaisia.



Kuva 4. Janitza UMG 604-PRO-mittauslaitteen tyypillinen kytkentä TN-S jakelujärjestelmään.

Konesalin mittauskohteissa liitännöistä on käytössä jännitteen- ja virranmittaus, erillinen apusähkön syöttö ja Ethernet-yhteys.

Mittauslaitteiden sallittu käyttölämpötila on laitevalmistajan mukaisesti -10 :n ja $+55$ C^o:n välillä. Suhteellisen ilman kosteuden vaihteluraja $+25$ C^o:n lämpötilassa on 5–95 %. Suositeltu käyttölämpötila on välillä $+18$ – $+28$ C^o, sillä lämpötila-alueen ulkopuolinen käyttölämpötila lisää laitteen mittausvirhettä $\pm 0,01$ % jokaista C^o-astetta kohden. Mittauslaitteen tarkkuus eri mittaussuureilla on

- jännitemittauksessa $\pm 0,2$ %
- virtamittauksessa vaihejohtimista $\pm 0,25$ %
- virtamittauksessa nollajohtimesta ± 1 %
- tehomittauksessa $\pm 0,4$ %
- harmoniset yliaallot U ja I, luokka 1 (DIN EN 61000-4-7)
- taajuudella $\pm 0,01$ Hz.

Luetellut tarkkuudet ovat voimassa, kun pätötehon mittauksessa käytettävän mittamuuntajien tarkkuusluokka on 0,5 S tai parempi. Loistehoa mitatessa tarkkuus on voimassa,

kun mittamuuntajien tarkkuusluokka on kaksi tai parempi. Konesalin kaikki mittamuuntajat ovat tarkkuusluokkaa yksi. Mittaustarkkuuden saavuttamiseksi edellytetään edellä mainittujen ehtojen lisäksi laitteiden vuosittainen kalibrointi, mittauslaitteen käynnistykseen jälkeinen kymmenen minuutin lämmitysjakso sekä +18–+28 C° välillä oleva ympäristön lämpötila.

6 Sähkön laatu mittauspisteissä

6.1 Mitattavat arvot

Työssä keskitytään pääkeskusten osalta historiatietoihin sekä hetkellismittauksiin. Tallentuneet tiedot pitemmältä aikaväliltä kuvaavat keskusten kuorman kasvua ja sen mahdollista ajallista vaihtelua. Pääkeskukset syöttävät muita keskuksia, joten historiatietojen tarkastelua ei ole tarpeellista tehdä jokaisen keskuksen kohdalla, vaan tuloksista voidaan päätellä riittävällä tarkkuudella kuormituksen kasvua eri keskuksissa.

Konesalin mittauspisteistä mitataan erilaisia hetkellisarvoja ja lisäksi tutkitaan tehoanalyysattorien tallentamaa mittauksen keskiarvotietoa pidemmältä ajanjaksolta pääkeskusten osalta. Saatu mittausdata tuodaan erillisestä mittausohjelmasta CSV-tiedostona laskentataulukko-ohjelmaan ja muokataan siellä helpommin analysoitavaan muotoon.

Hetkellisarvoja mitataan 15 minuutin ajan, joista muodostetaan mittausohjelmassa keskiarvo. Mitattavia suureita ovat

- tehokerroin $\cos \varphi$
- tehokerroin PF
- virran kokonaisharmoniset THD I
- jännitteen kokonaisharmoniset THD U
- virta RMS-arvona
- virta 50 Hz:n nimellistaajuudella
- jännite RMS-arvona
- jännite 50 Hz:n nimellistaajuudella
- jännitteen aaltomuoto

- virran aaltomuoto
- jännitteen harmonisten yliaaltojen spektriesitys
- virran harmonisten yliaaltojen spektriesitys.

Keskiarvona mitataan jännite, virta ja loisteteho. Mittaukset tehdään kaikista kolmesta vaiheesta sekä nollajohtimesta. Analysoitavan mittausjakson pituus on kuusi kuukautta, alkaen elokuusta 2018 ja päättyen tammikuun loppuun 2019. Mittaukset muutetaan vastaamaan 60 minuutin pituisia jaksoja, joissa tehoanalysointireihin tallentunut mittausdata on muutettu keskiarvoksi. Saaduista tuloksista kerätään suurin ja pienin arvo sekä niiden ajankohta mittausjaksolla.

Virtamittauksessa tapahtuvia mittausvirheitä voi aiheutua, jos käytettävä mittari ei sovellu yliaaltopitoisen virran mittaamiseen. Keskiarvomittauksesta saatava RMS-arvo kuvastaa täydellisen siniaallon lämmitystehoa. Epälineaaristen kuormien virran aaltomuoto ei ole sinimuotoinen. Mittausvirhe voi olla jopa 50 prosenttia, jos käytettävä mittari ei ole tarkoitettu säröytyneen virran mittaukseen [12, s. 1]. Konesaleissa tulee kiinnittää huomiota, että asennetut mittalaitteet soveltuvat epälineaarisen kuorman mittaukseen, varsinkin jos mittaus tuloksia hyödynnetään esimerkiksi hyötysuhteen laskentaan tai vastaavaan [13, s. 2].

Perustaajuuden kerrannaisia kutsutaan yliaalloiksi. Yliaallot voivat olla harmonisia tai epäharmonisia. Harmoniset yliaallot summautuvat verkkotaajuuden päälle. Summautuneet yliaallot saavat aikaan ylimääräisiä häviöitä ja lämpenemistä laitteissa. Harmonisia yliaaltoja syntyy, kun kuorman ottama virta ei ole lineaarista eli sinimuotoista. Särötyneet virta vaikuttaa syöttävään jännitteeseen ja saa siinä aikaan säröytymistä. Yliaaltoja aiheuttavia laitteita on yleisesti suuntaajakäytöt, muuntajat, LED-valaisimet ja IT-laitteet [6, s.16]. Tehoanalysointireillä saadaan mitattua virran ja jännitteen kokonaissärö THD sekä eri harmonisilla taajuuksilla virta- ja jännitearvot. Harmonisten yliaaltojen 40. järjestysluku on suurin mitattavissa oleva yliaalto.

Tehoanalysointireissa on mahdollista mitata kahta erilaista tehokerrointa. Tehokerroin $\cos \varphi$ lasketaan kaavalla

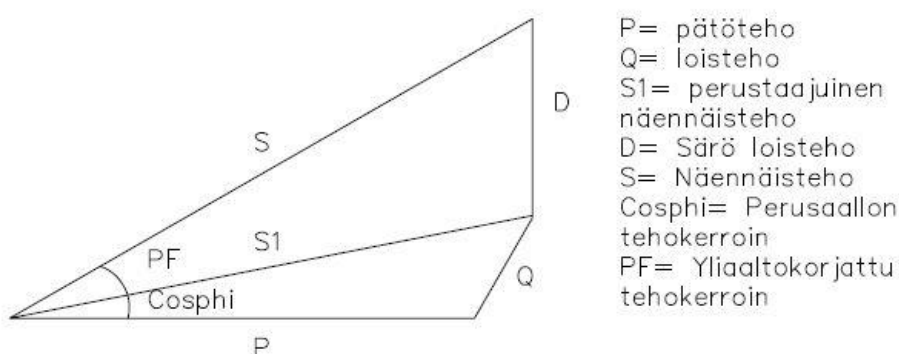
$$\varphi = \frac{P}{\sqrt{(P^2+Q^2)}} = \frac{P}{S_1} \quad (1)$$

ja tehokerroin PF kaavalla

$$\lambda = \frac{P}{\sqrt{(P^2+Q^2+D^2)}} = \frac{P}{S}, \quad (2)$$

joissa φ ja λ kuvastavat kulmia. [3, s. 29.]

Kuvassa 5 on havainnollistettu asiaa vektoripiirroksena. Kaavoilla saatu kulma saadaan muutettua kosinilauseen avulla tehokertoimeksi.



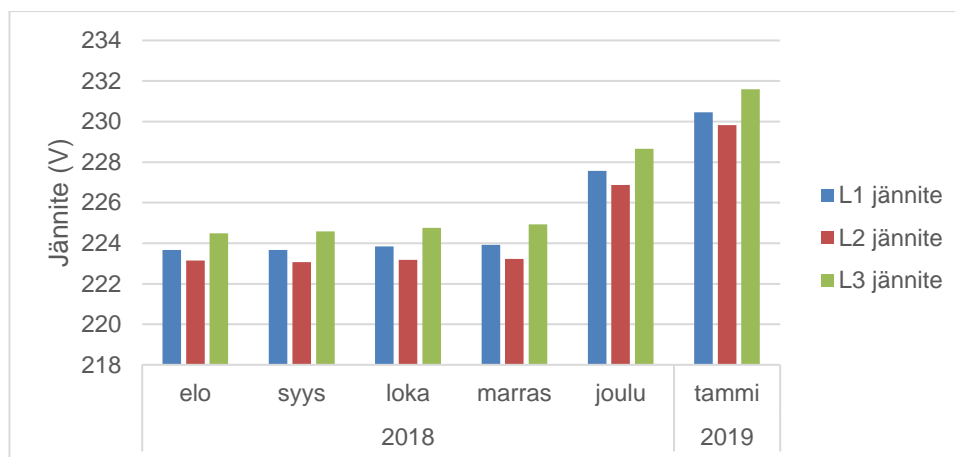
Kuva 5. Tehokerroin perusaallolla ja yliaaltopitoisessa järjestelmässä [3, s. 28].

$\cos \varphi$ on mitattu perusaallolla, jossa ei huomioida muita kuin 50 hertsin taajuuden pätö- ja loistehoja. Tehokerroin PF huomioi perusaallon ja yliaaltojen pätö- ja loistehot ja laskee näiden perusteella yliaaltopitoisen järjestelmän tehokertoimen. Tehokerroin PF soveltuu paremmin käytettäväksi yliaaltoja sisältävissä verkoissa, koska säröloisteho ja loisteho eivät tee työtä. [3, s. 29.]

6.2 A-pääkeskus

Hetkellismittauksen ja mittaushistorian lataus A-pääkeskuksen tehoanalysointia suoritetiin 15. helmikuuta 2019. Mittauspisteen tunnus on PK-A:Q1.

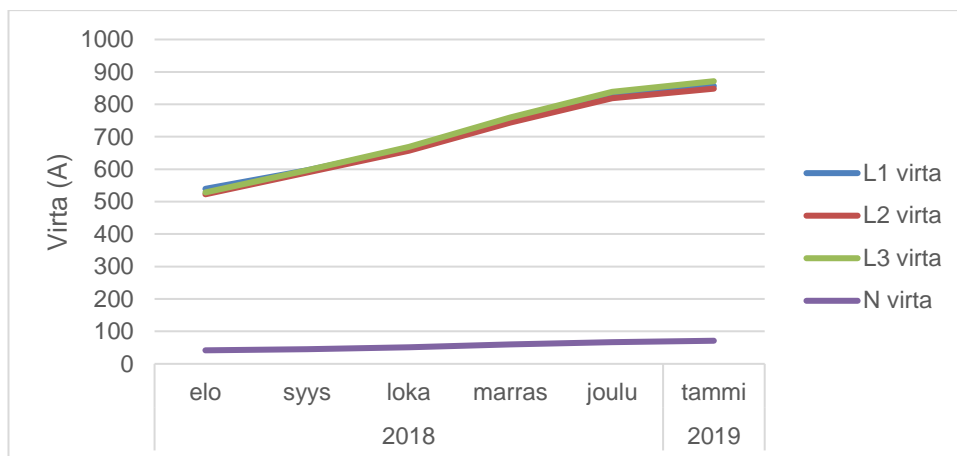
Jännitteen alin 60 minuutin keskiarvo oli 219,9 voltia L2-vaiheessa 24. marraskuuta 2018. Jännitteen suurin arvo 234,1 voltia oli L3-vaiheessa 1. tammikuuta 2019. Muokattaessa saatuja mittausarvoja kuvaajaksi huomattiin jännitetason nousseen kaikissa vaiheissa yhtäaikaisesti joulukuussa 2018. Jännitenousu on ollut pysyvää ja asettunut joulukuuta edeltävästä 224 voltin keskiarvosta noin 230 voltin lukemaan. Kuvassa 6 on esitetty jännitetasot keskiarvoina jokaisen kuukauden ajalta. Kuvasta voidaan havaita L2-vaiheen jännitteen olevan hieman muita vaiheita matalampi.



Kuva 6. A-pääkeskuksen vaihekohtaiset jännitetasot kuukausittain.

Joulukuussa 2018 tapahtunut jännitetason korotus on johtunut alueen jakeluverkon muutostöistä. Konesalipuisto on liitetty joulukuussa 110 kV-kantaverkkoon ja liittynnän yhteydessä puiston keskijännitejakelun jännitteen asettelua on nostettu noin kolme prosenttia.

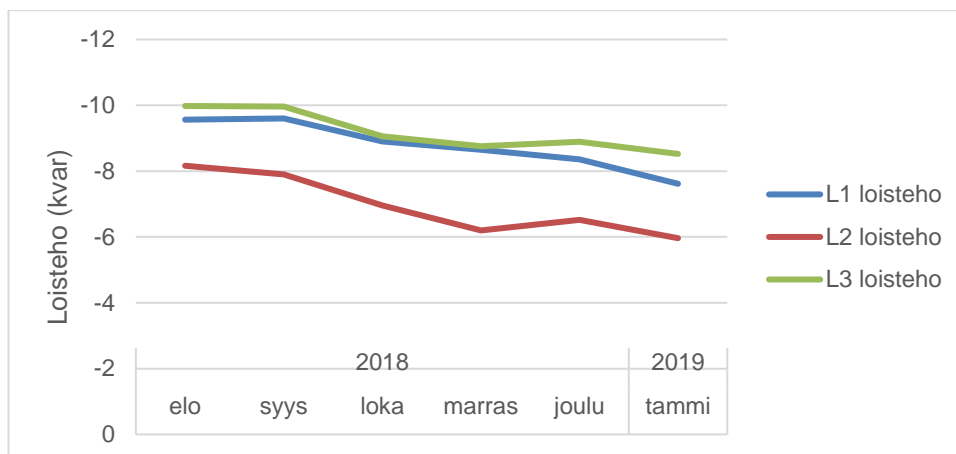
Virran suurin arvo 60 minuutin ajalta on ollut 930,7 ampeeria L3-vaiheessa 29. tammikuuta 2019. Alin arvo on ollut nolla ampeeria kaikissa vaiheissa 16. elokuuta 2018. Nollavirran huippuarvo on ollut 80,7 ampeeria 24. tammikuuta 2019. Vaihevirtojen ja nollavirran nousu on ollut jatkuvaa koko mittausjakson ajan. Kuvassa 7 on esitetty vaihevirtojen ja nollavirran nousua kuukausittain seurantajakson ajalta. Vaihevirtojen lähtötaso mittausjaksolla on hieman yli 500 ampeeria ja kohoaa mittausjakson lopulla lähes 900 ampeerin arvoon.



Kuva 7. A-pääkeskuksen vaihekohtaiset virrat kuukausittain.

Vaihevirtojen kasvu johtuu konesalin kuorman kasvusta. Vaihekohtaiset virrat ovat lähes yhteneviä, koska kytketty kuorma on symmetristä. Nollavirran kasvu kuvastaa kuormana olevien tasasuuntaajien aiheuttamaa nollajohtimeen summautuvaa harmonisten yliaaltojen virtaa. Virran nolla arvon voidaan olettaa johtuvan A-pääkeskuksen Q1-syöttökattaisijan avautumisesta. Mittauksen mukaan kohde on ollut jännitteinen koko seurantajakson ajan, mutta virtaa ei ole kulkenut yhtenä tunnin ajanjaksona. Tämä on mahdollista käyttämällä esimerkiksi varavoimakonetta saarekeajossa tai pääkeskusten välistä huoltoyhteyttä.

Loistehon tunnin huippuarvo on L3-vaiheessa 11,3 kilovaria 17. elokuuta 2018. Seurantajakson aikana loisteho on ollut induktiivista. Kuvasta 8 voidaan havaita vaihekohtaisen loistehon olevan laskemassa seurantajakson loppua kohden. L2-vaiheen loisteho on hieman muita vaiheita alhaisempi.



Kuva 8. A-pääkeskuksen vaihekohtainen loisteho kuukausittain.

Induktiivisen loistehon voidaan todeta olevan pieni keskuksen mitattuun kokonaistehoon nähden. Loistehon arvioidaan laskevan päätötehon nousun myötä, koska keskukseseen kytketyn UPS-järjestelmän kuorma kasvaa ja laitteen hyötysuhde on kuormituksesta riippuvainen tehdasmittausten perusteella. UPS-järjestelmässä on moduulikohtaiset tulosuodattimet, joissa on kondensaattoreita. Moduulit käynnistyvät tehon tarpeen mukaisesti. A-pääkeskuksen loistehoa tulee tarkkailla, jos loisteho muuttuu kapasitiiviseksi, niin se voi aiheuttaa ongelmia varavoimakoneen generaattorin säätäjälle saarekeajossa [2, s. 502].

Vaiheiden tehokerroin $\cos \varphi$ on 0,99 kaikissa kolmessa vaiheessa ja nollajohtimessa 0,83. Tehokerroin PF on vastaavasti myös 0,99 vaiheissa, mutta nollajohtimessa sen arvo on 0,11. Keskuksen kuormana toimii yksinomaan UPS-järjestelmä, jonka tasasuuntaajat on toteutettu IGBT-komponenteilla, jotka mahdollistavat lähes lineaarisen virran oton laitteelle ja siten hyvän tehokertoimen [2, s. 497].

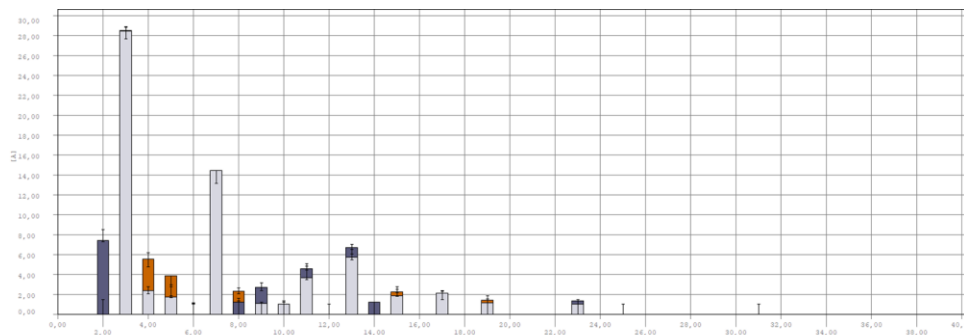
Harmonisia yliaaltoja on esitetty taulukossa 3. Jännitteen korkein THD-arvo on 0,89 % L3-vaiheessa. Taulukosta voidaan havaita nollajohtimien arvojen olevan monikertaisia verrattuna vaiheista mitattuihin harmonisiin yliaaltoihin. Jännitteen THD-epäsymmetria on vaiheiden välillä 0,16 %, vastaavasti virran THD-epäsymmetria on 0,78 %.

Taulukko 3. A-pääkeskuksen kokonaisharmoniset yliaallot vaiheittain. Mitattuna virran ja jännitteen THD arvot.

Mitattava suure	Mittaustyyppi	Tunnus	Arvo (%)
Virran kokonaissärö L1	Online 15 min avg	THD I	2,66
Virran kokonaissärö L2	Online 15 min avg	THD I	3,42
Virran kokonaissärö L3	Online 15 min avg	THD I	3,44
Virran kokonaissärö N	Online 15 min avg	THD I	418,15
Jännitteen kokonaissärö L1	Online 15 min avg	THD U	0,73
Jännitteen kokonaissärö L2	Online 15 min avg	THD U	0,81
Jännitteen kokonaissärö L3	Online 15 min avg	THD U	0,89
Jännitteen kokonaissärö N	Online 15 min avg	THD U	374,37

Mitatut vaiheiden jännitteen kokonaissärökertoimet (THD U) ovat matalia. Verrattaessa niitä esimerkiksi SFS-EN 50160 sallittuun arvoon, ovat ne noin kymmenesosa sallitusta arvosta [5, s. 22].

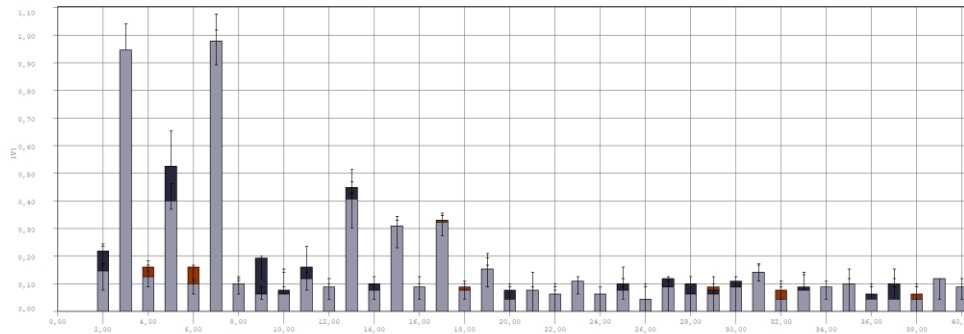
Kuvassa 9 on esitetty virran harmonisten yliaaltojen spektriesitystä 40. yliaaltoon saakka.



Kuva 9. A-pääkeskuksen virran harmonisten yliaaltojen spektriesitys.

Hallitsevia virran yliaaltoja ovat toinen, kolmas ja seitsemäs yliaalto.

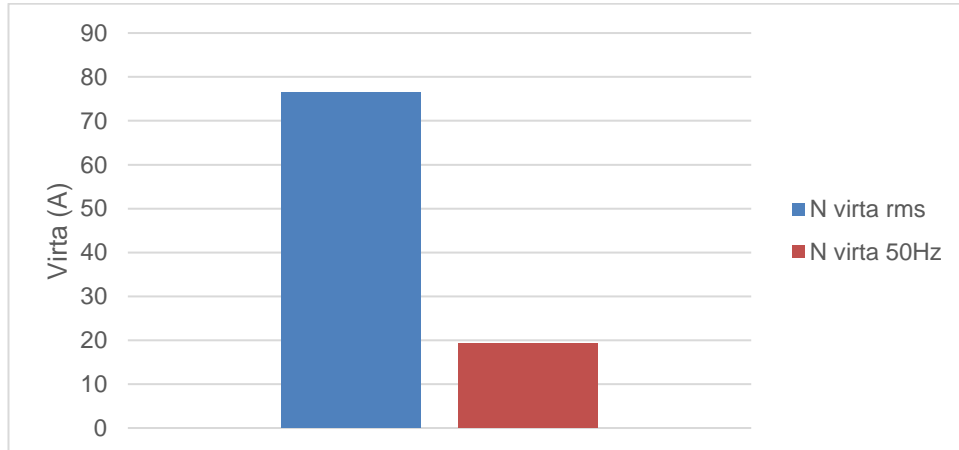
Kuvassa 10 on esitelty jännitteen harmonisten yliaaltojen spektriesitystä 40. yliaaltoon saakka.



Kuva 10. A-pääkeskuksen jännitteen harmonisten yliaaltojen spektriesitys.

Hallitsevia jännitteen yliaaltoja ovat kolmas, viides ja seitsemäs yliaalto.

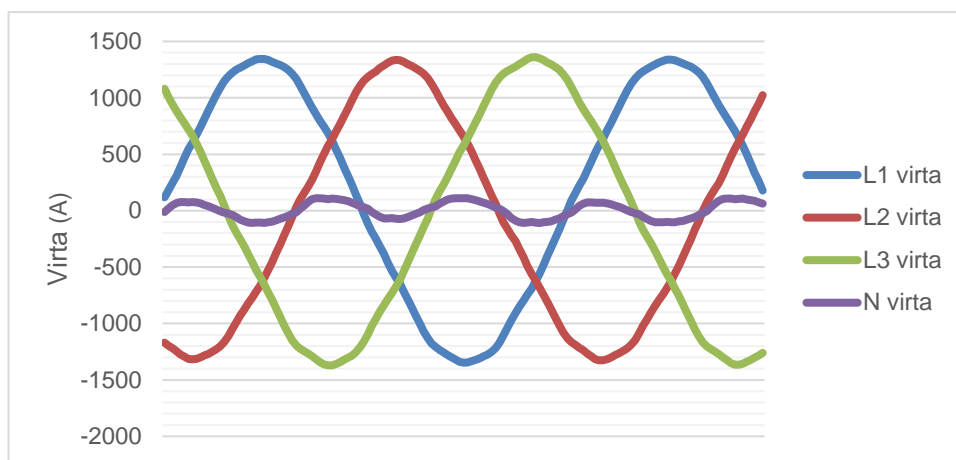
Hetkellismittauksessa virran suurin RMS-arvo oli 969,84 ampeeria L3-vaiheessa. Alin arvo oli 951,32 ampeeria L1-vaiheessa. Virran epäsymmetria on noin 1,9 prosenttia. Virrasta mitattiin myös nimellistaajuuden virta I_1 , jota nimetään työssä 50 Hz:n virraksi. Vaiheiden osalta 50 Hz:n virta oli yhtenevä virran RMS-arvon kanssa. Nollajohtimessa RMS-arvo oli 74,34 ampeeria. Kuvassa 11 on esitetty nollajohtimen RMS-virtaa sekä nimellistaajuuden virtaa.



Kuva 11. A-pääkeskuksen hetkellismittaus nollajohtimen virroista. Eriteltynä RMS- ja 50 hertsin taajuudella kulkeva virta.

Nollajohtimen tehollisen ja 50 hertsin taajuudella olevan virran välinen erotus kuvastaa johtimessa kulkevan pääsääntöisesti harmonisia yliaaltovirtoja, joiden taajuus poikkeaa

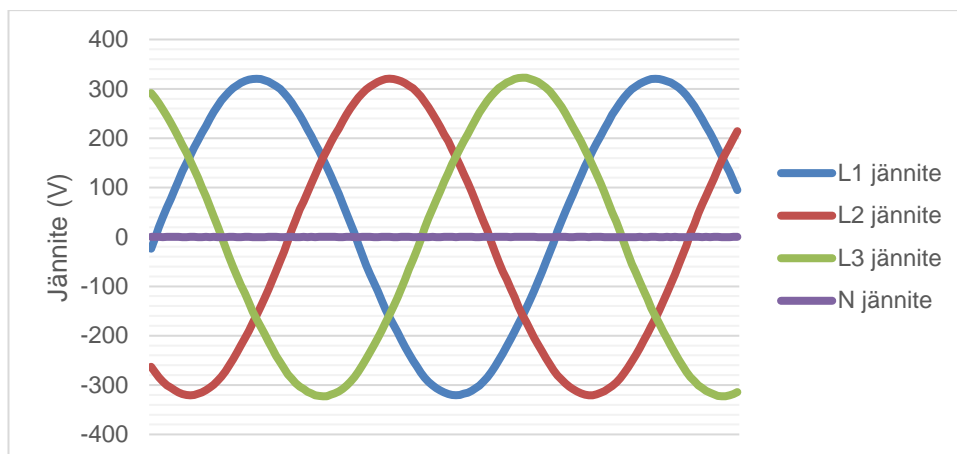
nimellistaajuudesta. Nimellistaajuuden virran arvioidaan johtuvan vaihevirtojen lievästä epäsymmetriasta. Kuvassa 12 on esitetty virran aaltomuotoja 30 millisekunnin ajalta.



Kuva 12. A-pääkeskuksen virran aaltomuoto puolentoista jakson ajalta.

Virran aaltomuodot ovat vaiheiden osalta lähes sinimuotoisia ja symmetrisiä keskenään. Nollajohtimessa kulkevan virran huippuarvo on noin 110 ampeeria. Nollajohtimessa kulkevan virran taajuus on noin kolminkertainen nimellistaajuuteen verrattuna. Vaiheissa kulkevan virran aaltomuoto kuvastaa UPS-laitteen tasasuuntaajan olevan tyypillinen IGBT-silta [9, s. 20].

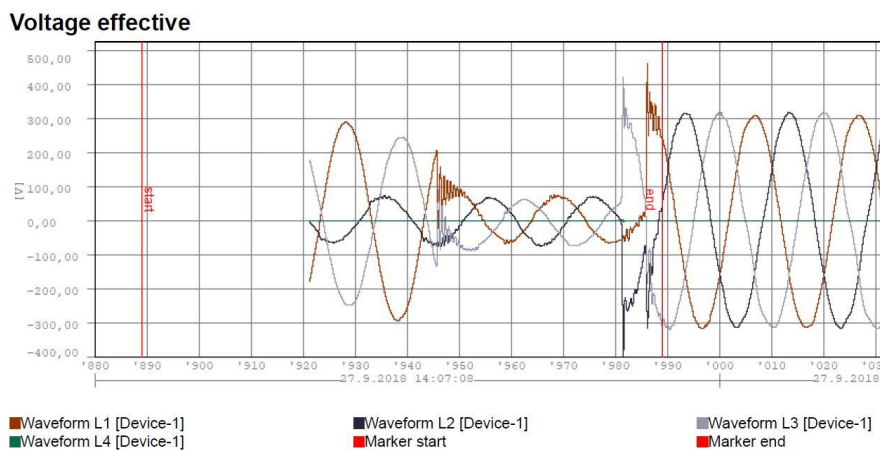
Jännitteen tehollisarvo oli korkeimmillaan 231,6 voltia L3-vaiheessa. Alin arvo oli 229,6 voltia L2-vaiheessa. Vaiheiden välinen epäsymmetria on noin 0,9 prosenttia. Jännitteen aaltomuotoja on esitetty 30 millisekunnin ajalta kuvassa 13.



Kuva 13. A-päätöskeskuksen jännitteen aaltomuoto puolentoista jakson ajalta.

Jännitteen aaltomuodon vaihejohtimisissa voidaan havaita olevan sinimuotoista ja keskenään symmetristä. Nollajohtimen jännitetaso on mittausten mukaan lähes nolla volttia.

A-päätöskeskuksessa on verkkoanalysoijan lokien mukaan käynyt jännitehäiriö 27. syyskuuta 2018. Häiriössä vaiheiden jännitetaso on ollut noin 50 millisekunnin ajan alle 100 volttia. Jännitehäiriön yhteydessä A-päätöskeskuksen virta on pudonnut nolnaan ja palautunut rampimuotoisesti lähtöarvoon noin 15 sekunnin kuluttua. Kuvassa 14 on esitetty verkkoanalysoijan tallennus jännitehäiriöstä.



Kuva 14. A-päätöskeskuksessa 27. syyskuuta 2018 tapahtunut jännitehäiriö.

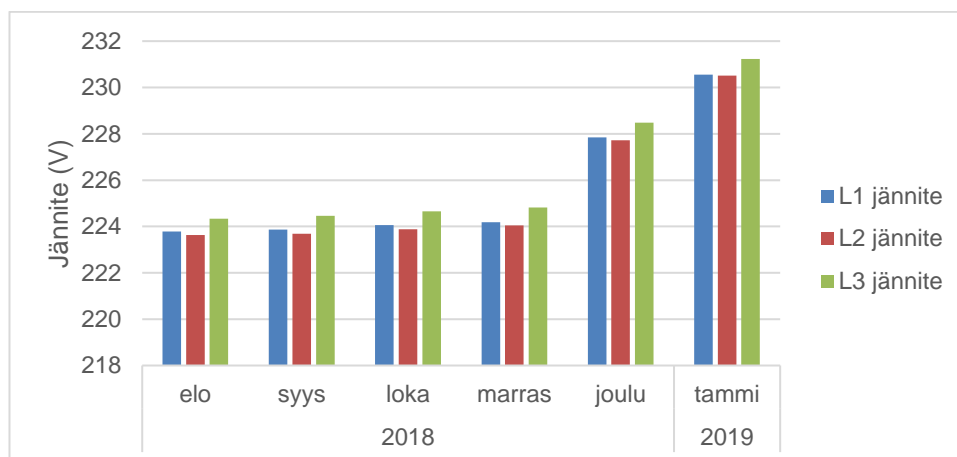
Kuvassa 14 näkyvän jännitehäiriön arvioidaan johtuvan keskijänniteverkossa olleesta lyhytaikaisesta viasta tai suuren kuorman kytkennästä. Virran putoaminen ja

rampimuotoinen palautuminen kuvastaa UPS-laitteen siirtyneen syöttämään kuormaa akustosta ja palautuneensa normaaliin syöttötilaan A-pääkeskuksen jännitetason vakiintumisen jälkeen. Virtakäyrää on esitetty tarkemmin liitteessä 2.

6.3 B-pääkeskus

Hetkellismittaukset ja mittaushistorian lataus tehoanalysointilaitteelta A-pääkeskuksella suoritettiin 15. helmikuuta 2019. Mittauspisteen tunnus on PK-B:Q1.

Jännitteen alin 60 minuutin keskiarvo on ollut 220,5 voltia 2. elokuuta 2018. Ylin arvo on ollut 233,2 voltia 23. tammikuuta 2019. Jännitteen nousu joulukuussa 2018 on ollut vastaava kuin A-pääkeskuksessa. Kuvassa 15 on esitetty jännitetasot keskiarvoina kuukausien ajalta. Kuvasta voidaan havaita L3-vaiheen jännitteen olevan hieman muita vaiheita korkeampi.

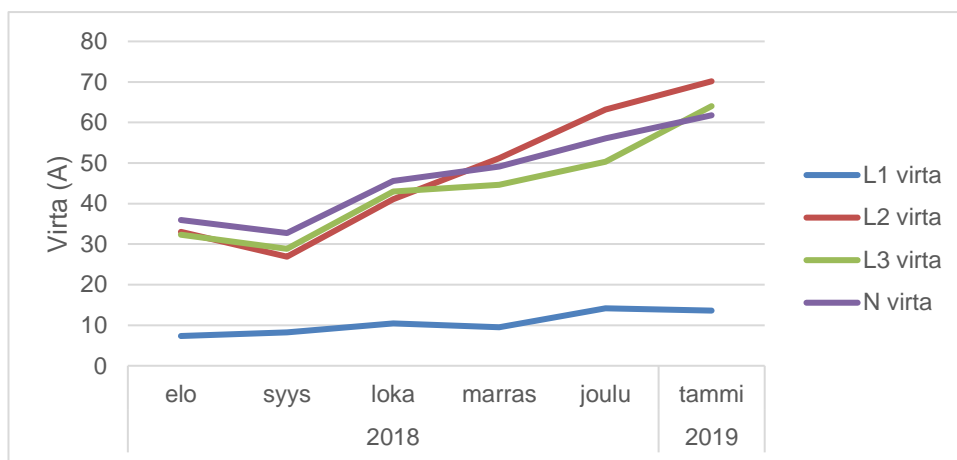


Kuva 15. B-pääkeskuksen vaihekohtaiset jännitetasot kuukausittain.

Pääkeskuksien syöttömuuntajia syötetään yhteisestä 20 kilovoltin jakeluverkosta, jossa tehdyt jännitteen korotukset ovat vaikuttaneet molempiin pääkeskuksiin.

Virran suurin arvo tunnin ajalta on ollut 584,3 ampeeria L1-vaiheessa 16. elokuuta 2018. Alin arvo on ollut nolla ampeeria kaikissa vaiheissa 17. elokuuta 2018. Nollajohtimessa kulkevan virran huippuarvo on ollut 51 ampeeria 16. elokuuta 2018. Vaihevirtojen ja nol-lavirran nousua on tapahtunut lähes koko mittausjakson ajan. Kuvassa 16 on esitettyä

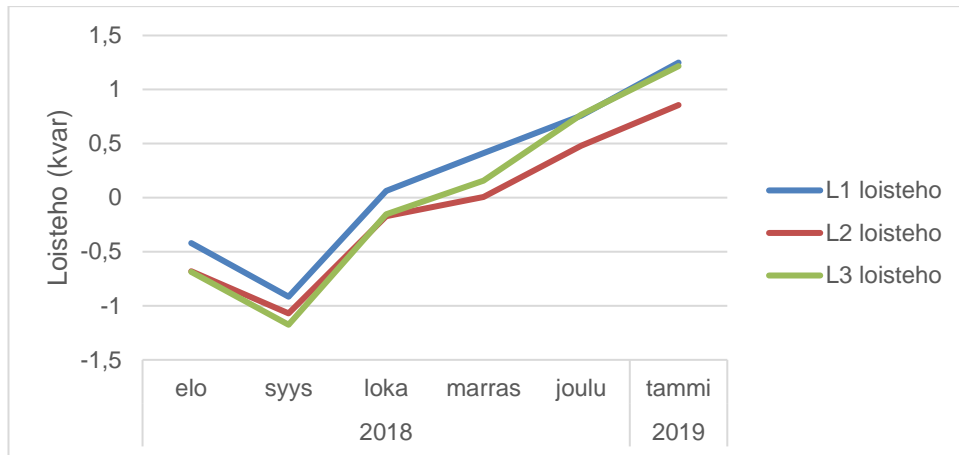
vaihevirtojen ja nollavirran nousua kuukausittain. Vaihevirtojen lähtötaso mittausjaksolla on hieman yli 30 ampeeria ja kohoaa mittausjakson lopulla noin 65 ampeerin arvoon.



Kuva 16. B-pääkeskuksen vaihekohtaiset virrat kuukausittain.

Virran alimman nolla arvon voidaan olettaa johtuvan B-pääkeskuksen Q1 syöttökatkaisijan avautumisesta. Virran korkein arvo ajoittuu elokuun päivälle, jolloin A-pääkeskuksen Q1 syöttökatkaisijan läpi ei ole kulkenut virtaa. Voidaan olettaa, että pääkeskusten välinen huoltoyhteys on ollut kiinni kyseisenä ajanhetkenä 16. elokuuta 2018, ja A-pääkeskusta on syötetty B-pääkeskuksen muuntajalla.

Loistehon tunnin kapasitiivinen huippuarvo on L1-vaiheessa 23,4 kilovaria 2. elokuuta 2018. Alin loistehon induktiivinen arvo on 10,6 kilovaria 16. elokuuta 2019. Seurantajakson aikana loisteho on ollut kapasitiivista sekä induktiivista. Kuvasta 17 voidaan havaita vaihekohtaisen loistehon olevan seurantajakson lopulla kapasitiivista.



Kuva 17. B-pääkeskuksen vaihekohtainen loisteho kuukausittain.

Vaiheiden tehokerroin $\cos \varphi$ on 0,99 kaikissa kolmessa vaiheessa ja nollajohtimessa 0,66. Tehokerroin PF on noin 0,96 vaiheissa, nollajohtimessa sen arvo on 0,17.

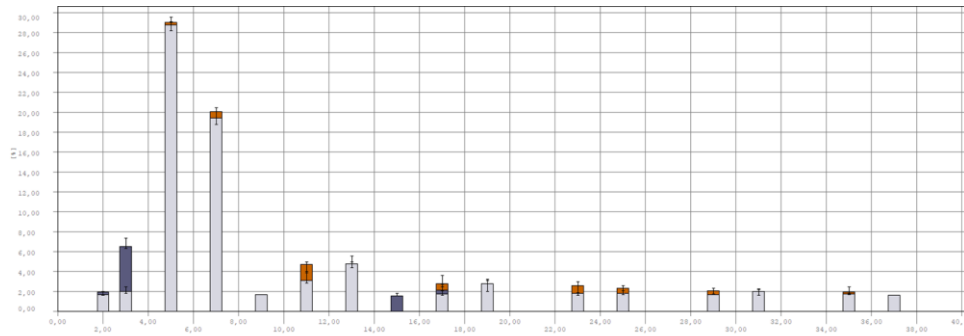
Harmonisia yliaaltoja on esitetty taulukossa 4. Jännitteen korkein THD-arvo on 0,68 % L3-vaiheessa. Taulukosta voidaan havaita jännitteen kokonaissärön olevan nollajohtimessa moninkertainen verrattuna vaiheista mitattuihin säröihin. Jännitteen THD epäsymmetria on vaiheiden välillä 0,08 % ja virran THD epäsymmetria on 10,43 %.

Taulukko 4. B-pääkeskuksen kokonaisharmoniset yliaallot vaiheittain. Mitattuna virran ja jännitteen THD arvot.

Mitattava suure	Mittaustyyppi	Tunnus	Arvo (%)
Virran kokonaissärö L1	Online 15 min avg	THD _I	32,34
Virran kokonaissärö L2	Online 15 min avg	THD _I	28,82
Virran kokonaissärö L3	Online 15 min avg	THD _I	21,91
Virran kokonaissärö N	Online 15 min avg	THD _I	41,05
Jännitteen kokonaissärö L1	Online 15 min avg	THD _U	0,60
Jännitteen kokonaissärö L2	Online 15 min avg	THD _U	0,61
Jännitteen kokonaissärö L3	Online 15 min avg	THD _U	0,68
Jännitteen kokonaissärö N	Online 15 min avg	THD _U	422,68

Mitatut vaiheiden jännitteen kokonaissärökertoimet (THD_U) ovat matalia. Verrattaessa niitä esimerkiksi SFS-EN 50160 sallittuun arvoon ovat ne noin kahdestoistaosa sallitusta arvosta [5, s. 22].

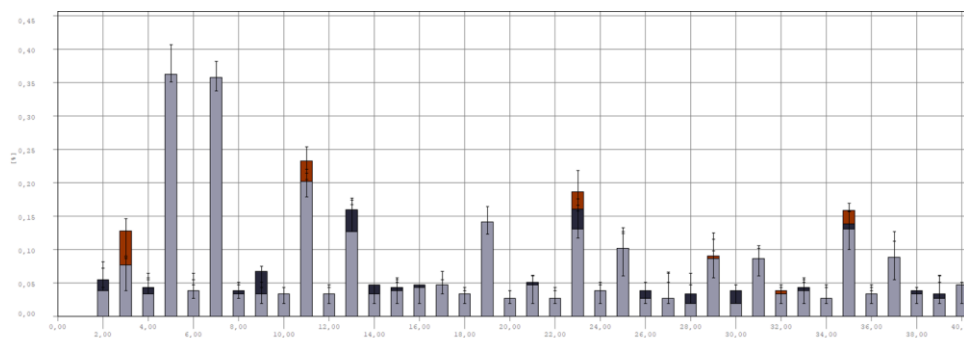
Kuvassa 18 on esitetty virran harmonisten yliaaltojen spektriesitystä 40. yliaaltoon saakka.



Kuva 18. B-pääkeskuksen virran harmonisten yliaaltojen spektriesitys.

Hallitsevia virran yliaaltoja ovat viides ja seitsemäs yliaalto.

Kuvassa 19 on esitelty jännitteen harmonisten yliaaltojen spektriesitystä 40. yliaaltoon saakka.

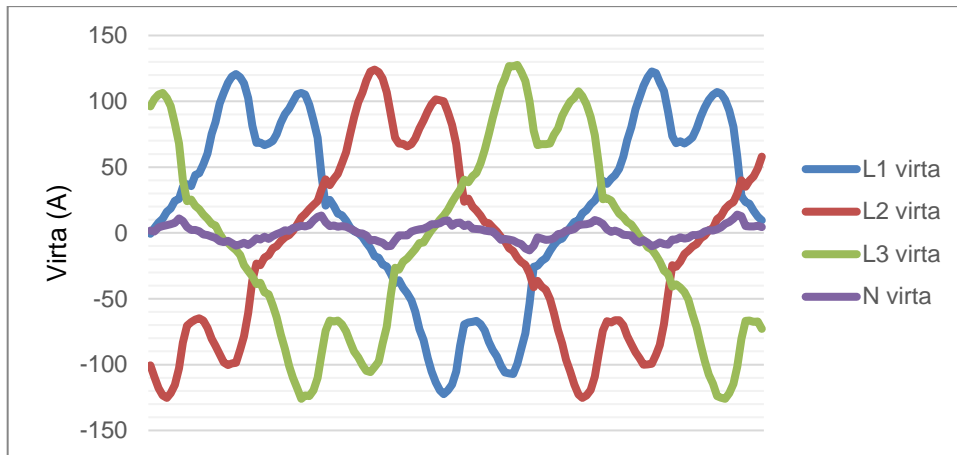


Kuva 19. B-pääkeskuksen jännitteen harmonisten yliaaltojen spektriesitys.

Hallitsevia jännitteen yliaaltoja ovat viides ja seitsemäs yliaalto.

Hetkellismittauksessa virran suurin RMS-arvo oli 82 ampeeria L3-vaiheessa. Alin arvo oli 57,6 ampeeria L1-vaiheessa. Virran epäsymmetria on noin 29,8 prosenttia. Nimellistaajuinen virta ja RMS-virta eroavat hieman toisistaan kaikkien vaiheiden ja nollajohtimen osalta.

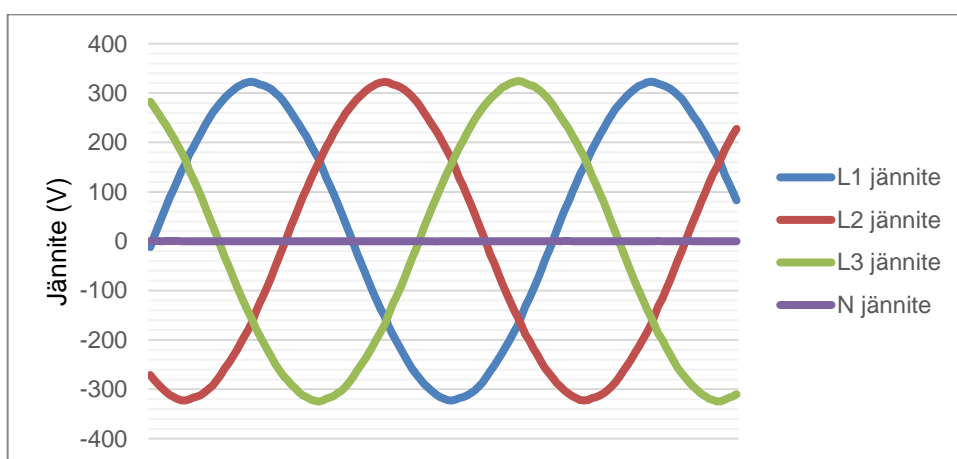
Kuvassa 20 on esitetty virran aaltomuotoja 30 millisekunnin ajalta.



Kuva 20. B-pääkeskuksen virran aaltomuoto puolentoista jakson ajalta.

Virran aaltomuodot ovat vaiheiden osalta voimakkaasti vääristyneitä ja symmetrisiä keskenään. Nollajohtimessa kulkevan virran huippuarvo on noin 13 ampeeria ja taajuus on noin kolminkertainen nimellistaajuuteen verrattuna. Mitattu virran aaltomuoto kuvastaa kuormana olevien kolmivaiheisten jäähdytyspuhaltimien moottoreissa olevan 6-pulssi-suuntaajan vaikutusta virran aaltomuotoon [3, s. 9].

Jännitteen tehollisarvo oli suurimmillaan 232,3 voltia L3-vaiheessa. Alin arvo oli 231,6 voltia L1-vaiheessa. Vaiheiden välinen epäsymmetria on noin 0,3 prosenttia. Jännitteen aaltumuotoja on esitetty 30 millisekunnin ajalta kuvassa 21.



Kuva 21. B-pääkeskuksen jännitteen aaltomuoto puolentoista jakson ajalta.

Jännitteen aaltomuodon vaihejohtimisissa voidaan havaita olevan sinimuotoista ja keskenään symmetristä. Nollajohtimen jännitetaso on mittausten mukaan lähes nolla volttia.

B-pääkeskuksessa on verkkoanalysointilokien mukaan käynyt samanaikainen jännitehäiriö, kuin A-pääkeskuksessakin 27. syyskuuta 2018. Molemmat pääkeskukset ovat syötetty yhteisestä keskijänniteverkosta, jossa ovat häiriöt vaikuttavat molempiin pääkeskuksiin.

6.4 UPS-jakokeskus

Hetkellismittaukset ja mittaushistorian lataus tehoanalysointilokilta UPS-jakokeskuksella suoritettiin 15. helmikuuta 2019.

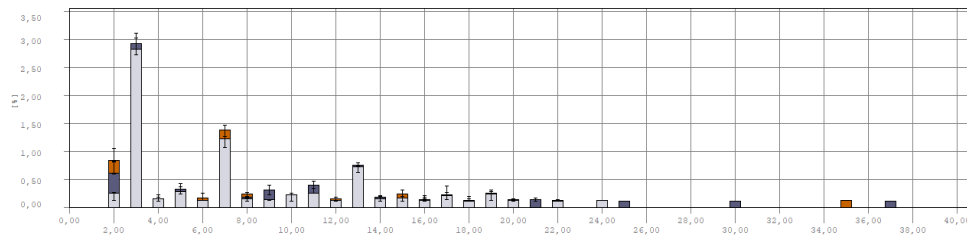
Vaiheiden tehokerroin $\cos \varphi$ on noin 0,92 kaikissa kolmessa vaiheessa ja nollajohtimessa 0,29. Tehokerroin PF on noin 0,91 vaiheissa ja nollajohtimessa sen arvo on 0,25.

Harmonisia yliaaltoja on esitetty taulukossa 5. Jännitteen korkein THD-arvo on 0,96 % L3-vaiheessa. Jännitteen THD-epäsymmetria on vaiheiden välillä 0,08 %, vastaavasti virran THD-epäsymmetria on 0,21 %.

Taulukko 5. UPS-jakokeskuksen kokonaisharmoniset yliaallot vaiheittain. Mitattuna virran ja jännitteen THD arvot.

Mitattava suure	Mittaustyyppi	Tunnus	Arvo (%)
Virran kokonaissärö L1	Online 15 min avg	THD _I	13,01
Virran kokonaissärö L2	Online 15 min avg	THD _I	12,90
Virran kokonaissärö L3	Online 15 min avg	THD _I	12,80
Virran kokonaissärö N	Online 15 min avg	THD _I	419,04
Jännitteen kokonaissärö L1	Online 15 min avg	THD _U	0,88
Jännitteen kokonaissärö L2	Online 15 min avg	THD _U	0,91
Jännitteen kokonaissärö L3	Online 15 min avg	THD _U	0,96
Jännitteen kokonaissärö N	Online 15 min avg	THD _U	172,18

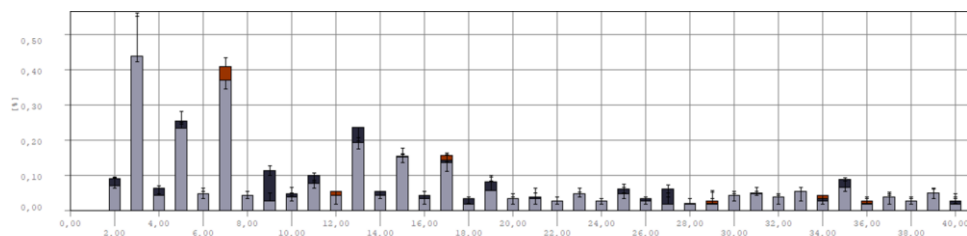
Kuvassa 22 on esitetty virran harmonisten yliaaltojen spektriesitystä 40. yliaaltoon saakka.



Kuva 22. UPS-jakokeskuksen virran harmonisten yliaaltojen spektriesitys.

Hallitsevia virran yliaaltoja ovat kolmas ja seitsemäs yliaalto.

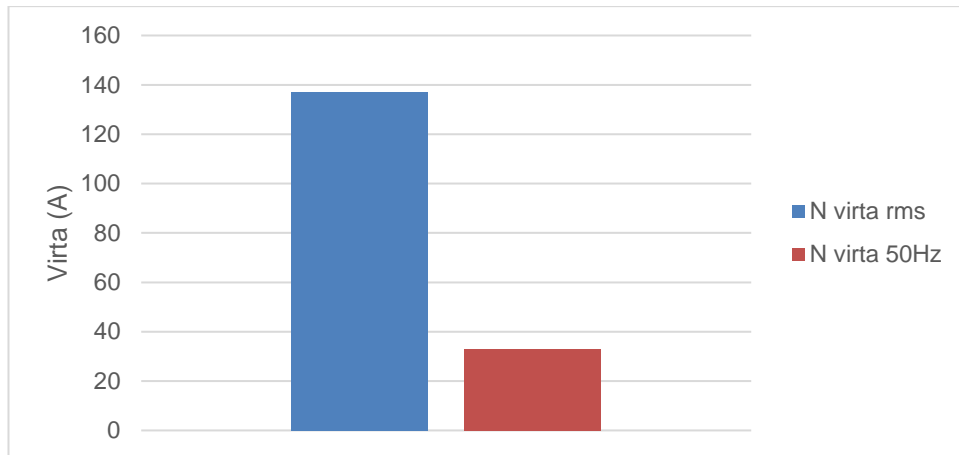
Kuvassa 23 on esitelty jännitteen harmonisten yliaaltojen spektriesitystä 40. yliaaltoon saakka.



Kuva 23. UPS-jakokeskuksen jännitteen harmonisten yliaaltojen spektriesitys.

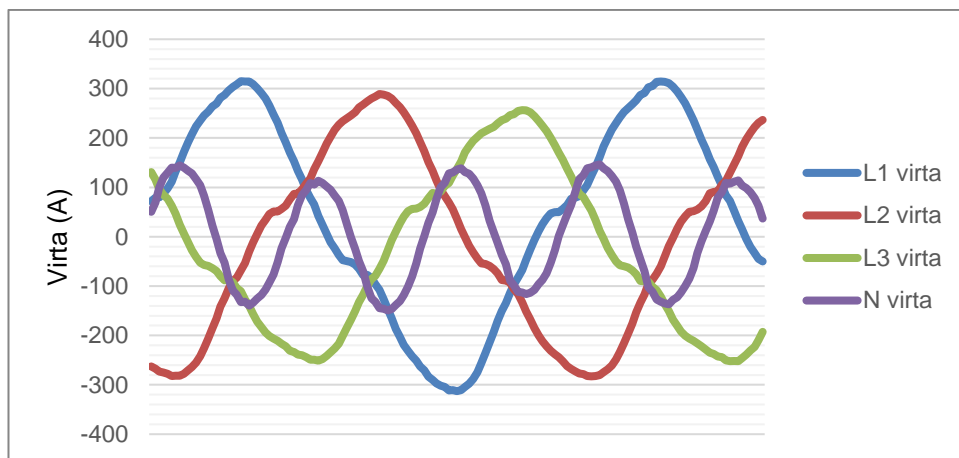
Hallitsevia jännitteen yliaaltoja ovat kolmas, viides ja seitsemäs yliaalto.

Hetkellismittauksessa virran suurin RMS-arvo oli 407,8 ampeeria L2-vaiheessa. Alin arvo oli 370,8 ampeeria L1-vaiheessa. Virran epäsymmetria on noin 9,1 prosenttia. Nimellistaajuinen virta oli vaiheiden osalta lähes yhtenevä virran RMS-arvon kanssa. Nollajohtimessa RMS-arvo oli 137,04 ampeeria. Kuvassa 24 on esitetty nollajohtimen RMS-virtaa sekä nimellistaajuuden virtaa.



Kuva 24. UPS-jakokeskuksen hetkellismittaus nollajohtimen virroista. Eriteltynä RMS- ja 50 hertsin taajuudella kulkeva virta.

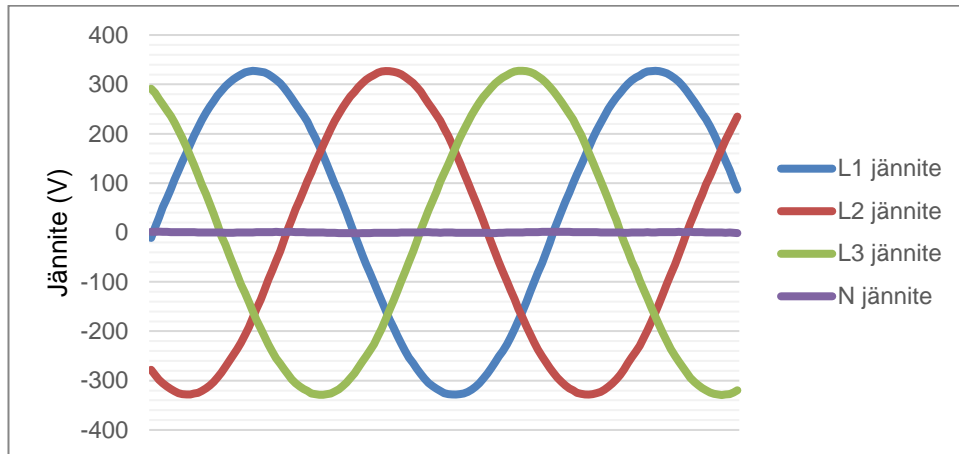
Nollajohtimen tehollisen ja 50 hertsin taajuudella olevan virran välinen erotus kuvastaa johtimessa kulkevan pääsääntöisesti harmonisia yliaaltovirtoja, joiden taajuus poikkeaa nimellistaajuudesta. Nimellistaajuuden virran arvioidaan johtuvan vaihevirtojen lievistä epäsymmetriasta. Kuvassa 25 on esitetty virran aaltomuotoja 30 millisekunnin ajalta.



Kuva 25. UPS-jakokeskuksen virran aaltomuoto puolentoista jakson ajalta.

Virran aaltomuodot ovat vaiheiden osalta lievästi vääristyneen sinimuotoisia ja huippuarvoiltaan epäsymmetrisiä keskenään. Nollajohtimessa kulkevan virran huippuarvo on noin 140 ampeeria ja taajuus noin kolminkertainen nimellistaajuuteen verrattuna.

Jännitteen tehollisarvo oli suurimmillaan 233,5 voltia L3-vaiheessa. Alin arvo oli 233,3 voltia L2-vaiheessa. Vaiheiden välinen epäsymmetria on hyvin pieni. Jännitteen aaltomuotoja on esitetty 30 millisekunnin ajalta kuvassa 26.



Kuva 26. UPS-jakokeskuksen jännitteen aaltomuoto puolentoista jakson ajalta.

Jännitteen aaltomuodon vaihejohtimisissa voidaan havaita olevan sinimuotoista ja keskenään symmetristä. Nollajohtimen jännitteen huippuarvo on noin yksi voltti.

6.5 Ryhmäkeskus IT-1

Hetkellismittaukset ja mittaushistorian lataus tehoanalysaattorilta ryhmäkeskus IT-1:ssä suoritettiin 16. helmikuuta 2019.

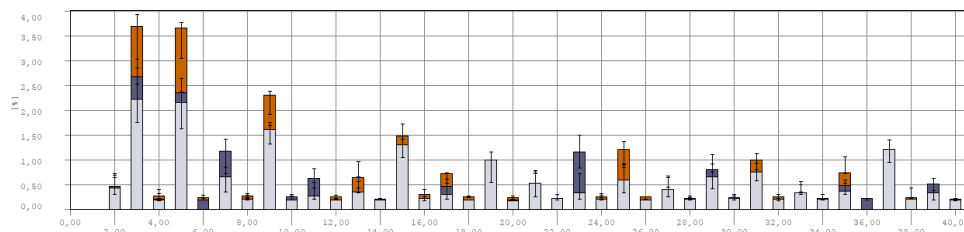
Tehokerroin $\cos \phi$ on vaiheissa noin 0,98 ja nollajohtimessa 0,9. Tehokerroin PF on noin 0,98 vaiheissa ja nollajohtimessa sen arvo on 0,82.

Harmonisia yliaaltoja on esitetty taulukossa 6. Jännitteen korkein THD-arvo on 1,21 % L3-vaiheessa. Jännitteen THD epäsymmetria on vaiheiden välillä 0,17 %, vastaavasti virran THD-epäsymmetria on 1,63 %.

Taulukko 6. Ryhmäkeskus IT-1:en kokonaisharmoniset yliaallot vaiheittain. Mitattuna virran ja jännitteen THD arvot.

Mitattava suure	Mittaustyyppi	Tunnus	Arvo (%)
Virran kokonaissärö L1	Online 15 min avg	THD _I	6,31
Virran kokonaissärö L2	Online 15 min avg	THD _I	4,98
Virran kokonaissärö L3	Online 15 min avg	THD _I	4,68
Virran kokonaissärö N	Online 15 min avg	THD _I	75,85
Jännitteen kokonaissärö L1	Online 15 min avg	THD _U	1,04
Jännitteen kokonaissärö L2	Online 15 min avg	THD _U	1,1
Jännitteen kokonaissärö L3	Online 15 min avg	THD _U	1,21
Jännitteen kokonaissärö N	Online 15 min avg	THD _U	39,63

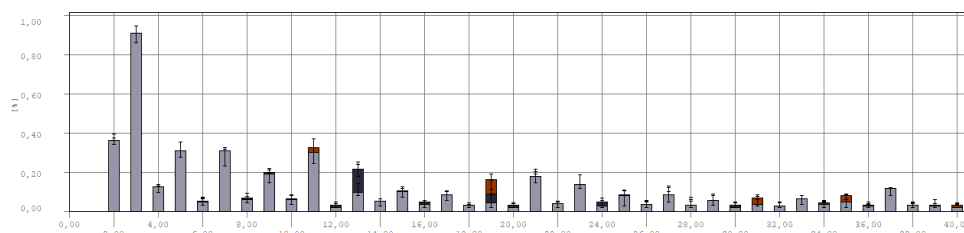
Kuvassa 27 on esitetty virran harmonisten yliaaltojen spektriesitystä 40. yliaaltoon saakka.



Kuva 27. Ryhmäkeskus IT-1:en virran harmonisten yliaaltojen spektriesitys.

Hallitsevia virran yliaaltoja ovat kolmas, viides ja yhdeksäs yliaalto.

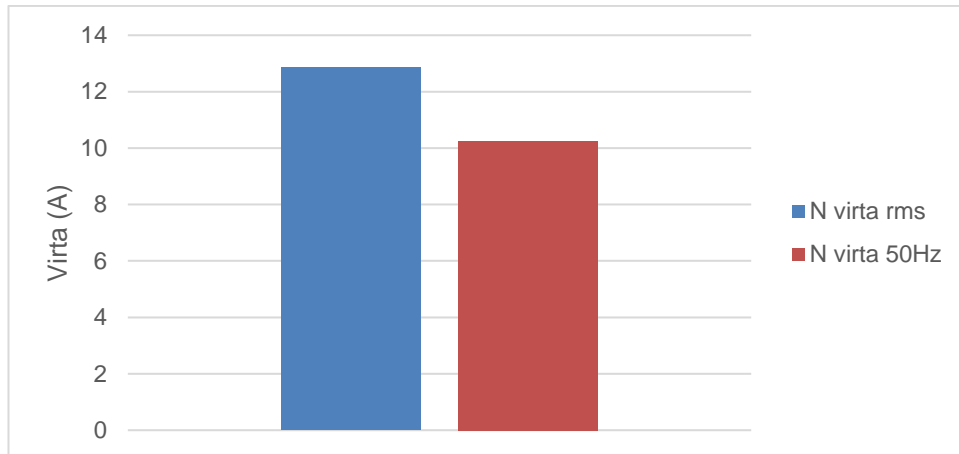
Kuvassa 28 on esitetty jännitteen harmonisten yliaaltojen spektriesitystä 40. yliaaltoon saakka.



Kuva 28. Ryhmäkeskus IT-1:en jännitteen harmonisten yliaaltojen spektriesitys.

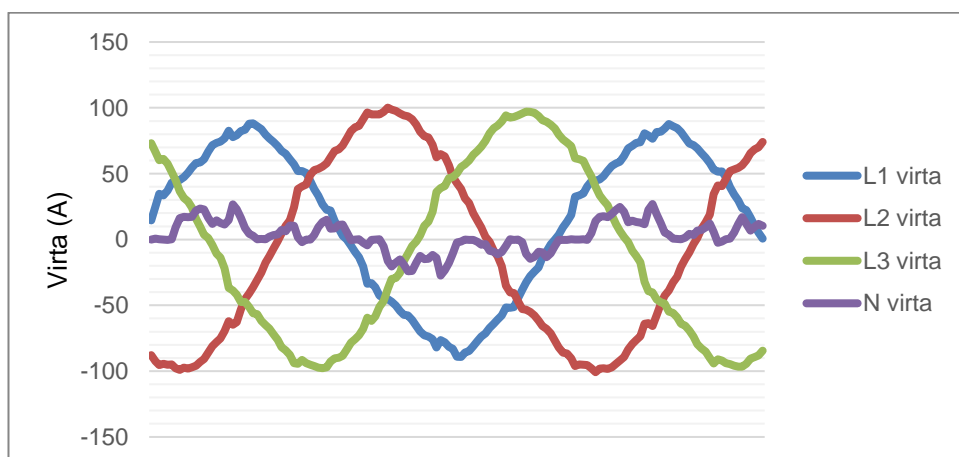
Hallitsevia jännitteen yliaaltoja ovat toinen ja kolmas yliaalto.

Hetkellismittauksessa virran suurin RMS-arvo oli 69,62 ampeeria L2-vaiheessa. Alin arvo oli 58,37 ampeeria L1-vaiheessa. Virran epäsymmetria on noin 16,2 prosenttia. Nimellistaajuiset virrat olivat vaiheiden osalta yhteneviä virran RMS-arvon kanssa. Nollajohtimessa RMS-arvo oli 12,85 ampeeria. Kuvassa 29 on esitetty nollajohtimen RMS-virtaa sekä nimellistaajuuden virtaa.



Kuva 29. Ryhmäkeskus IT-1:en hetkellismittaus nollajohtimen virroista. Eriteltynä RMS- ja 50 hertsin taajuudella kulkeva virta.

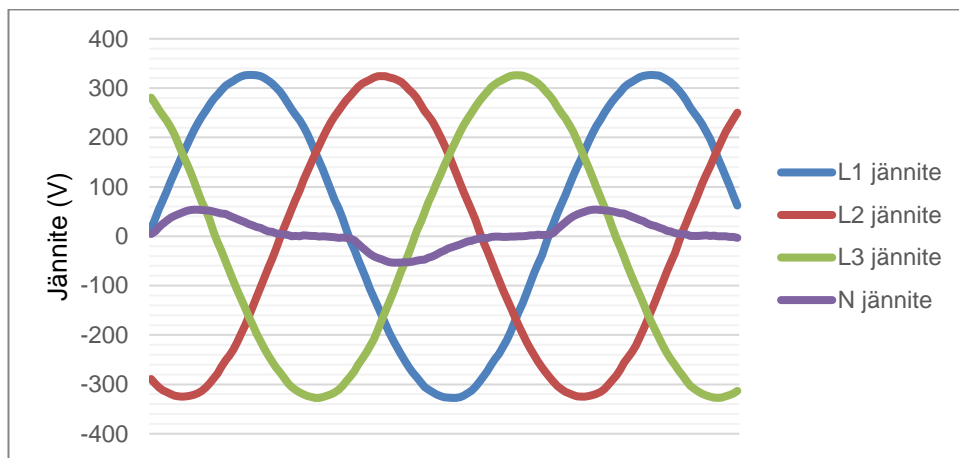
Nollajohtimen tehollisen ja 50 hertsin taajuudella olevan virran välinen erotus on hyvin pieni. Johtimessa kulkeva virta on lähes puhdasta nimellistaajuudella kulkevaa virtaa. Virran arvioidaan johtuvan vaihevirtojen epäsymmetriasta. Kuvassa 30 on esitetty virran aaltomuotoja 30 millisekunnin ajalta.



Kuva 30. Ryhmäkeskus IT-1:en virran aaltomuoto puolentoista jakson ajalta.

Kuvan 30 virran aaltomuodot ovat vaiheiden osalta lievästi vääristyneen sinimuotoisia ja huippuarvoiltaan epäsymmetrisiä keskenään. Nollajohtimessa kulkevan virran huippuarvo on noin 27 ampeeria ja aaltomuodoltaan se on vääristyneen sinimuotoinen. Virran aaltomuoto kuvastaa kuormana olevien IT-laitteiden tasasuuntaajien olevan perinteisestä hakkuritekniikasta poikkeavia [3, s. 12].

Jännitteen tehollisarvo oli suurimmillaan 233,2 voltia L1-vaiheessa. Alin arvo oli 231,5 voltia L2-vaiheessa. Vaiheiden välinen epäsymmetria on 0,7 prosenttia. Jännitteen aaltomuotoja on esitetty 30 millisekunnin ajalta kuvassa 31.



Kuva 31. Ryhmäkeskus IT-1:en jännitteen aaltomuoto puolentoista jakson ajalta.

Jännitteen aaltomuodon voidaan havaita olevan vaihejohtimisissa sinimuotoista ja keskenään symmetristä. Nollajohtimen jännitteen huippuarvo on noin 54 voltia. Nollajohtimen jännitteen arvioidaan johtuvan virran kolmannen harmonisen yliaallon summautumisesta nollajohtimeen.

6.6 Ryhmäkeskus IT-2

Hetkellismittaukset ja mittaushistorian lataus tehoanalysaattorilta ryhmäkeskus IT-2:ssa suoritettiin 16. helmikuuta 2019.

Vaiheiden tehokerroin $\cos \varphi$ on noin 0,91 kaikissa kolmessa vaiheessa ja nollajohtimessa 0,84. Tehokerroin PF on noin 0,90 vaiheissa ja nollajohtimessa sen arvo on 0,11.

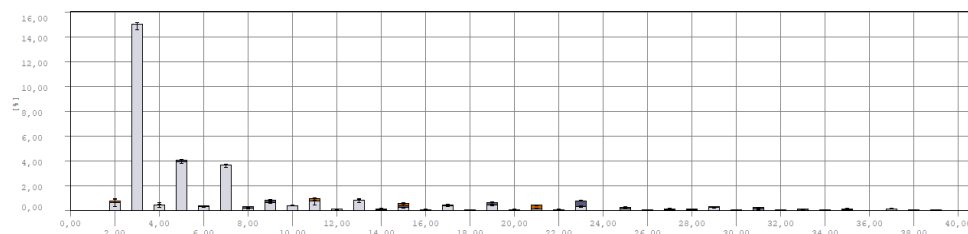
Harmonisia yliaaltoja on esitetty taulukossa 7. Jännitteen korkein THD-arvo on 3,20 % L3-vaiheessa. Jännitteen THD-epäsymmetria on vaiheiden välillä 0,57% ja virran THD-epäsymmetria on 0,44 %.

Taulukko 7. Ryhmäkeskus IT-2:en kokonaisharmoniset yliaallot vaiheittain. Mitattuna virran ja jännitteen THD arvot.

Mitattava suure	Mittaustyyppi	Tunnus	Arvo (%)
Virran kokonaissärö L1	Online 15 min avg	THD _I	15,4
Virran kokonaissärö L2	Online 15 min avg	THD _I	15,71
Virran kokonaissärö L3	Online 15 min avg	THD _I	15,84
Virran kokonaissärö N	Online 15 min avg	THD _I	1123,45
Jännitteen kokonaissärö L1	Online 15 min avg	THD _U	2,63
Jännitteen kokonaissärö L2	Online 15 min avg	THD _U	2,85
Jännitteen kokonaissärö L3	Online 15 min avg	THD _U	3,2
Jännitteen kokonaissärö N	Online 15 min avg	THD _U	32,84

Ryhmäkeskus IT-2:sta mitatut vaiheiden jännitteen kokonaissärökertoimet (THD_U) ovat kaikkien mittauspisteiden arvoista korkeimmat. Verrattaessa niitä esimerkiksi SFS-EN 50160 sallittuun arvoon, ovat ne noin kolmasosa sallitusta arvosta [5, s. 22].

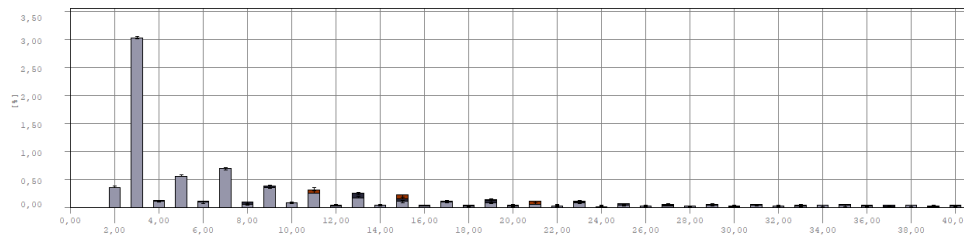
Kuvassa 32 on esitetty virran harmonisten yliaaltojen spektriesitystä 40. yliaaltoon saakka.



Kuva 32. Ryhmäkeskus IT-2:en virran harmonisten yliaaltojen spektriesitys.

Hallitsevia virran yliaaltoja ovat kolmas, viides ja seitsemäs yliaalto.

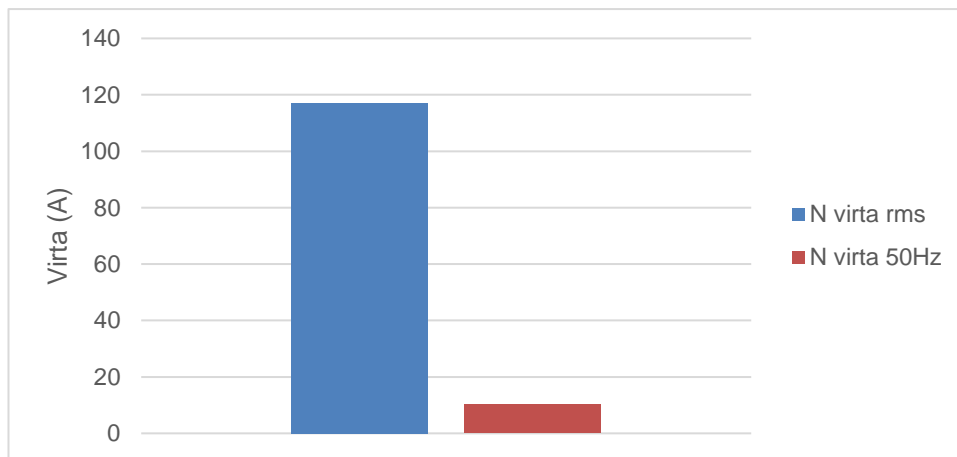
Kuvassa 33 on esitelty jännitteen harmonisten yliaaltojen spektriesitystä 40. yliaaltoon saakka.



Kuva 33. Ryhmäkeskus IT-2:en jännitteen harmonisten yliaaltojen spektriesitys.

Hallitsevia jännitteen yliaaltoja ovat kolmas, viides ja seitsemäs yliaalto.

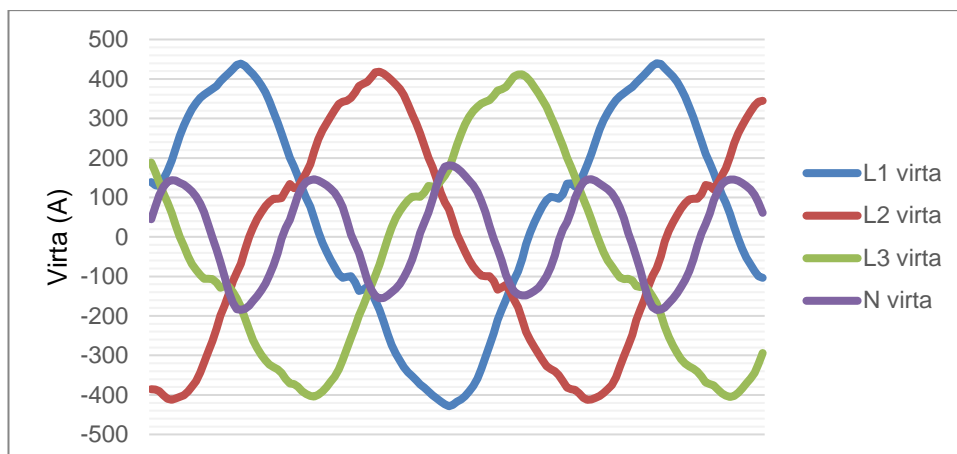
Hetkellismittauksessa virran suurin RMS-arvo oli 282,47 ampeeria L1-vaiheessa. Alin arvo oli 269,39 ampeeria L1-vaiheessa. Virran epäsymmetria on noin 4,6 prosenttia. Nimellistaajuiset virrat olivat vaiheiden osalta lähes yhteneviä virran RMS-arvojen kanssa. Nollajohtimen RMS-virta oli 117 ampeeria. Kuvassa 34 on esitetty nollajohtimen RMS-virta sekä nimellistaajuinen virta.



Kuva 34. Ryhmäkeskus IT-2:en hetkellismittaus nollajohtimen virroista. Eriteltynä RMS-virta ja 50 hertsin taajuudella kulkeva virta.

Nollajohtimen tehollisen ja 50 hertsin taajuisen virran välinen erotus on hyvin suuri. Johtimessa kulkeva virta on lähes puhdasta yliaalto virtaa. Virran arvioidaan johtuvan nollajohtimeen summautuvista yliaalloista. Nimellistaajuudella kulkevan virran arvioidaan johtuvan vaihevirtojen epäsymmetriasta.

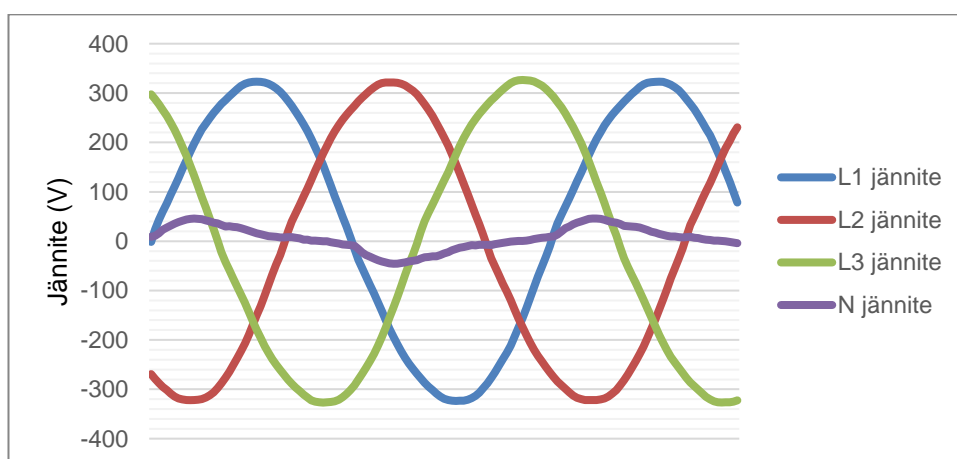
Kuvassa 35 on esitetty virran aaltomuotoja 30 millisekunnin ajalta.



Kuva 35. Ryhmäkeskus IT-2:en virran aaltomuoto puolentoista jakson ajalta.

Virran aaltomuodot ovat vaiheiden osalta vääristyneen sinimuotoisia ja huippuarvoiltaan lähes symmetrisiä keskenään. Nollajohtimessa kulkevan virran huippuarvo on noin 177 ampeeria ja taajuus on noin kolminkertainen nimellistaajuuteen verrattuna. Virran aaltomuoto kuvastaa kuormana olevien IT-laitteiden hakkuriteholähteen ottamaa virran aaltomuotoa [3, s. 12].

Jännitteen tehollisarvo oli suurimmillaan 233,2 voltia L3-vaiheessa. Alin arvo oli 231,1 voltia L1-vaiheessa. Vaiheiden välinen epäsymmetria on 0,1 prosenttia. Jännitteen aaltomuotoja on esitetty 30 millisekunnin ajalta kuvassa 36.



Kuva 36. Ryhmäkeskus IT-2:en jännitteen aaltomuoto puolentoista jakson ajalta.

Jännitteen aaltomuodon vaihejohtimisissa voidaan havaita olevan sinimuotoista ja keskenään symmetristä. Nollajohtimen jännitteen huippuarvo on noin 45 voltia.

6.7 Ryhmäkeskus-IV

Hetkellismittaukset ja mittaushistorian lataus tehoanalysointilaitteelta suoritettiin ryhmäkeskus-IV:ssä 16. helmikuuta 2019.

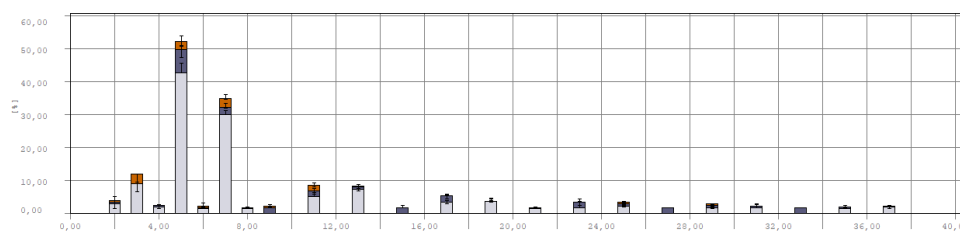
Vaiheiden tehokerroin $\cos \varphi$ on noin 0,99 kaikissa kolmessa vaiheessa ja nollajohtimessa 0,89. Tehokerroin PF on noin 0,82 vaiheissa, nollajohtimessa sen arvo on 0,31.

Harmonisia yliaaltoja on esitetty taulukossa 8. Jännitteen korkein THD-arvo on 0,78 % L3-vaiheessa. Jännitteen THD-epäsymmetria on vaiheiden välillä 0,07 % ja virran THD-epäsymmetria on 7,27 %.

Taulukko 8. Ryhmäkeskus-IV:n kokonaisharmoniset yliaallot vaiheittain. Mitattuna virran ja jännitteen THD arvot.

Mitattava suure	Mittaustyyppi	Tunnus	Arvo (%)
Virran kokonaissärö L1	Online 15 min avg	THD _I	69,08
Virran kokonaissärö L2	Online 15 min avg	THD _I	67,49
Virran kokonaissärö L3	Online 15 min avg	THD _I	61,81
Virran kokonaissärö N	Online 15 min avg	THD _I	43,32
Jännitteen kokonaissärö L1	Online 15 min avg	THD _U	0,71
Jännitteen kokonaissärö L2	Online 15 min avg	THD _U	0,71
Jännitteen kokonaissärö L3	Online 15 min avg	THD _U	0,78
Jännitteen kokonaissärö N	Online 15 min avg	THD _U	329,63

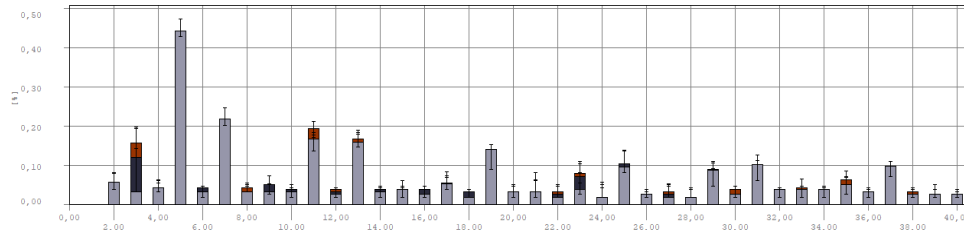
Kuvassa 37 on esitetty virran harmonisten yliaaltojen spektriesitystä 40. yliaaltoon saakka.



Kuva 37. Ryhmäkeskus-IV:n virran harmonisten yliaaltojen spektriesitys.

Kuvassa 37 esitetyistä virran yliaalloista hallitsevia ovat viides ja seitsemäs yliaalto.

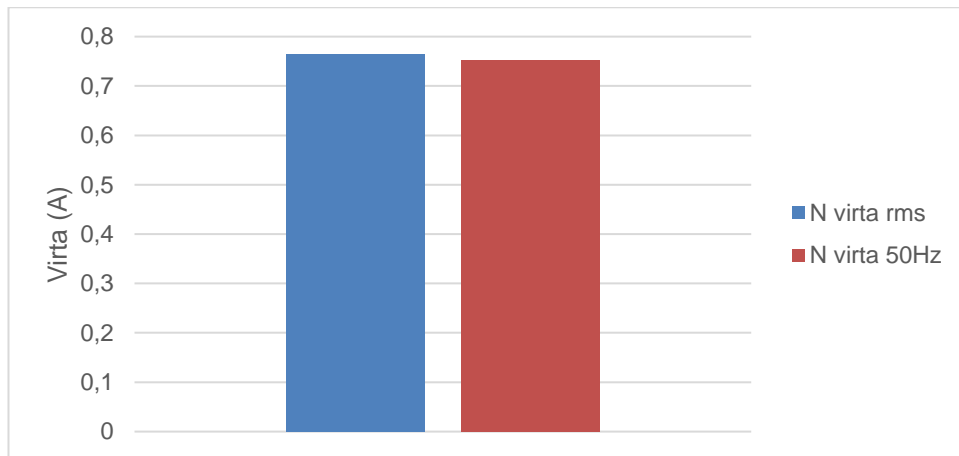
Kuvassa 38 on esitelty jännitteen harmonisten yliaaltojen spektriesitystä 40. yliaaltoon saakka.



Kuva 38. Ryhmäkeskus-IV:n jännitteen harmonisten yliaaltojen spektriesitys.

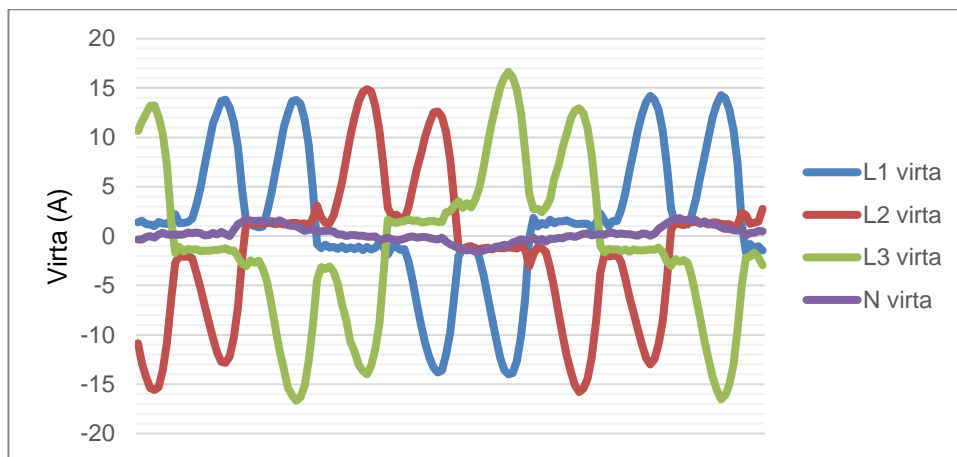
Hallitsevia jännitteen yliaaltoja ovat viides ja seitsemäs yliaalto.

Hetkellismittauksessa virran suurin RMS-arvo oli 8,1 ampeeria L3-vaiheessa. Alin arvo oli 7,3 ampeeria L1-vaiheessa. Virran epäsymmetria on noin 9,2 prosenttia. Nimellistääjuuden virta eroaa virran RMS-arvoista, joka kuvastaa mitattujen tehokertoimien $\cos \varphi$ ja PF eroavaisuuksia. Nollajohtimessa RMS-arvo oli 0,76 ampeeria. Kuvassa 39 on esitetty nollajohtimen RMS-virtaa sekä nimellistääjuuden virtaa.



Kuva 39. Ryhmäkeskus-IV:n hetkellismittaus nollajohtimen virroista. Eriteltynä RMS-virta ja 50 hertsin taajuudella kulkeva virta.

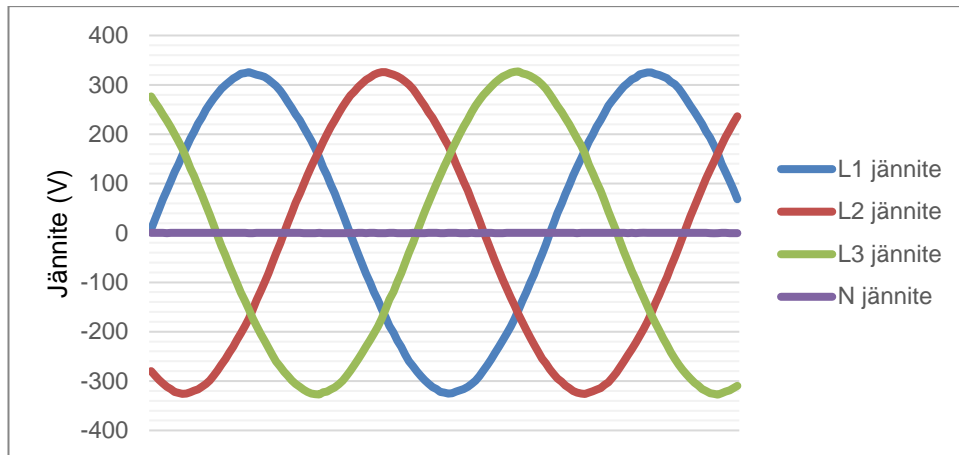
Nollajohtimen tehollisen ja 50 hertsin taajuudella olevan virran välinen erotus on hyvin pieni. Johtimessa kulkeva virta on lähes puhdasta nimellistaajuista virtaa. Virran arvioidaan johtuvan vaiheiden epäsymmetrisestä kuormituksesta. Kuvassa 40 on esitetty virran aaltomuotoja 30 millisekunnin ajalta.



Kuva 40. Ryhmäkeskus-IV:n virran aaltomuoto puolentoista jakson ajalta.

Virran aaltomuodot ovat vaiheiden osalta voimakkaasti vääristyneitä ja huippuarvoiltaan hieman epäsymmetrisiä keskenään. Nollajohtimessa kulkevan virran huippuarvo on noin 1,7 ampeeria ja taajuudeltaan noin kolminkertainen nimellistaajuuteen verrattuna. Virran aaltomuoto kuvastaa yleisintä tasasuuntaustekniikkaa eli 6-pulssista diodisiltaa. Suuntaaja on tekniikaltaan yksinkertainen ja edullinen, mutta se tuottaa yleensä suuren määrän harmonisia yliaaltoja, varsinkin jos verkon tasoitusinduktanssi on alhainen. [9, s. 18.]

Jännitteen tehollisarvo oli suurimmillaan 231,1 voltia L3-vaiheessa. Alin arvo oli 230,7 voltia L1-vaiheessa. Vaiheiden välinen epäsymmetria on 0,2 prosenttia. Jännitteen aaltomuotoja on esitetty 30 millisekunnin ajalta kuvassa 41.

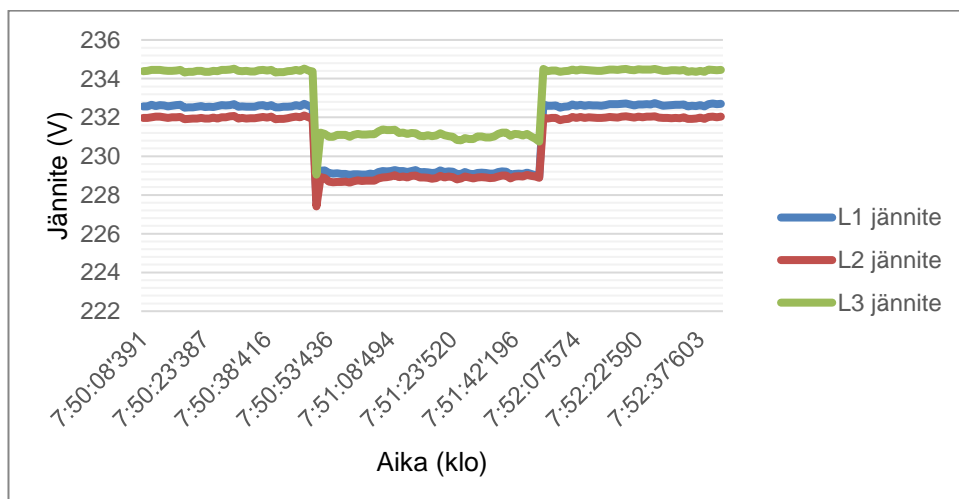


Kuva 41. Ryhmäkeskus-IV:n jännitteen aaltomuoto puolentoista jakson ajalta.

Jännitteen aaltomuodon vaihejohtimisissa voidaan havaita olevan sinimuotoista ja keskenään symmetristä. Nollajohtimen jännite on lähes nolla voltia. Keskukseen virta on hyvin säröytynyttä, mutta sen vaikutus syöttävään jännitteeseen on hyvin pieni.

6.8 Kytkenätilanteet

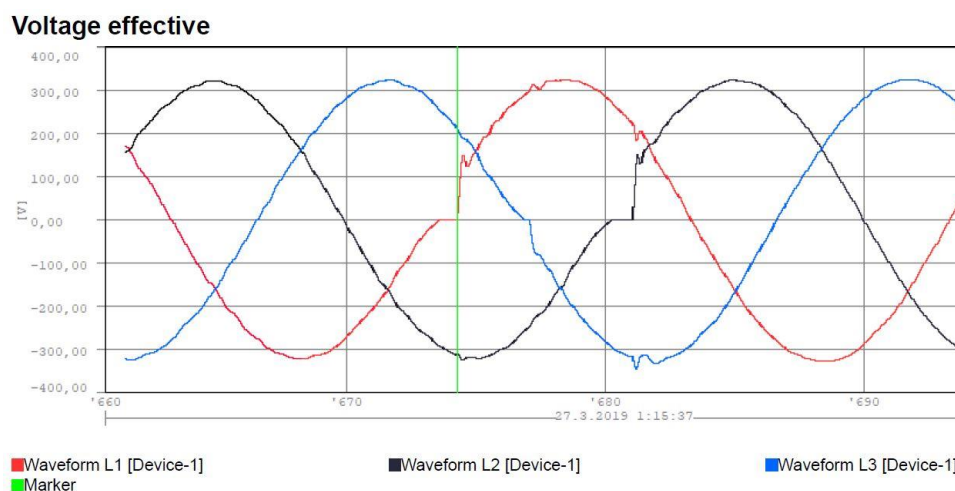
Järjestelmän komponentit voivat aiheuttaa jännitehäiriöitä. Kuvassa 42 on esitetty staattisen vaihtokytkimen syötönvaihto, jossa syöttöä vaihdetaan hetkeksi kahden eri pisteestä tulevan syötön välillä.



Kuva 42. Staattisen vaihtokytkimen vaihtotapahtuma kahden syötön välillä.

Vaihdon jälkeen syöttö palautetaan takaisin alkuperäiselle syöttölinjalle. Vaihtotapahtuman aikana molemmat syötöt ovat hetken aikaa auki, jotta syötöt eivät keskenään kytkeydy toisiinsa vaihtohetkellä. Kuvasta 42 voidaan havaita eri syöttöjen jännitetasojen olevan toisistaan hieman poikkeavat ja jännitteen putoamisen vaihtohetken yhteydessä.

Kuvassa 43 on esitetty toinen staattisen vaihtokytkimen syötönvaihto vaihejännitteiden aaltomuodoissa. Vaaka-akselin pituus on noin 33 millisekuntia. Ensimmäisenä jännitekatko näkyy L1-vaiheessa, jossa vaihto toiselle syötölle tapahtuu vihreän pystyviivan kohdalla.



Kuva 43. STS-vaihtotapahtuma, jossa näkyy kolmen vaiheen jännitteen aaltomuodot.

Kuvasta voidaan havaita, että vaihekohtaisessa syötönvaihdossa tapahtuva jännitekatko kestää noin yhden millisekunnin. Vaiheiden syötönvaihdon kokonaispituus on noin 7,5 millisekuntia. Vaihtohetken liittyvät tiedot ovat

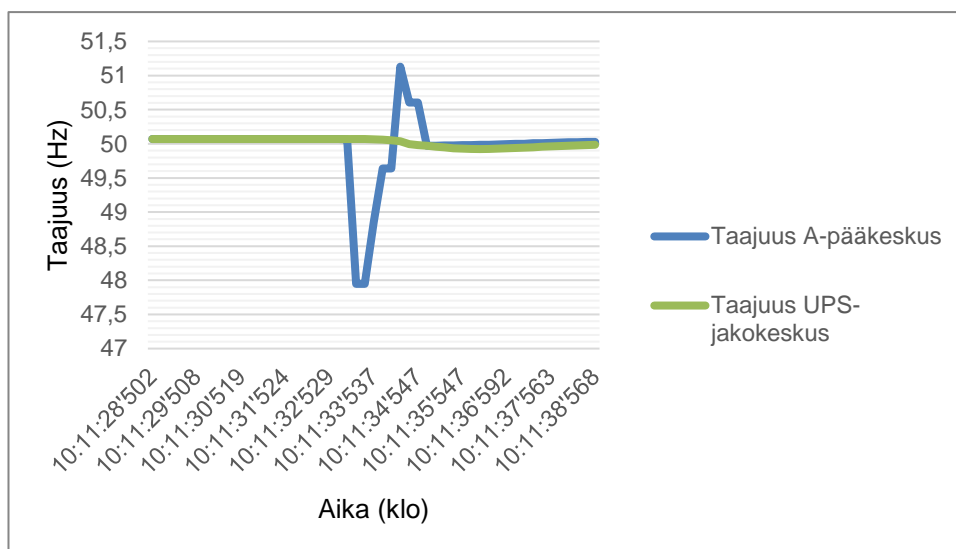
- kuorman tehokerroin PF on 0,98
- kuorman kolmivaiheteho noin 45 kW
- syöttöjen välinen pätötehon kulmaero alle yksi aste.

Jännitteen aaltomuodon huipulla näkyy vaihtotapahtuman jälkeen piikki, jonka arvioidaan johtuvan kuormana olevien virtalähteiden ottamasta hetkellisestä virtapiikistä jännitekatkon jälkeen.

6.9 Varavoiman käyttäminen

Saarekeajossa varavoimakoneen säädinlaitteisto tahdistaa generaattorin taajuuden samaksi, kuin A-pääkeskuksen taajuus. Hetken kuluttua säädin ohjaa generaattorin katkaisijan kiinni ja varavoimakoneen generaattori alkaa syöttämään A-pääkeskusta sekä verkkoa. Tehosta riippuvan ajan kuluttua säädin ohjaa A-pääkeskuksen muuntajasyötön katkaisijan Q1 auki. Kytöntätilanteessa keskuksen kuormitus siirtyy kokonaisuudessaan generaattorille. Saarekeajolle voidaan siirtyä käyttäjän toimesta tai automaattisesti verkkohäiriön yhteydessä.

Kuvassa 43 on esitetty kytöntähetki, jossa A-pääkeskuksen kuorma siirtyy saarekeajossa varavoimakoneen generaattorille. Kytöntähetki alkaa ajankohdassa 10.11.32'529. Kytöntähetkellä keskuksen taajuus putoaa, jolloin säädinlaitteisto reagoi generaattorin kuorman kasvuun ja lisää voimakoneen momenttia. Taajuus nousee säätimen vaikutuksesta hieman yli nimellistaajuuden ja palautuu nopeasti nimellistaajuuteen. Muutoksen kesto kokonaisuudessaan on noin kahden sekunnin luokkaa. Kuvasta voidaan havaita UPS-jakokeskuksen taajuudessa lievä muutos, jonka voidaan arvioida johtuvan UPS-laitteesta tapahtuvasta säätötoiminnasta. UPS-laite tarkkailee jatkuvasti syöttö- sekä lähtötaajuutta ja säätää toimintaansa mitattujen arvojen mukaisesti pyrkien pitämään syöttävän ja syötettävän verkon taajuuden synkronoituna keskenään.



Kuva 44. A-pääkeskuksen syöttäminen varavoimakoneella. Kuvassa näkyy kytöntähetki, jossa keskuksen kuorma siirtyy kokonaisuudessaan generaattorille ja sen vaikutus taajuuteen.

Saarekeajon aikana kuormassa tapahtuvat isot tehomuutokset näkyvät usein jännitteen sekä taajuuden vaihteluina. Muutokset ovat riippuvaisia generaattorin, voimakoneen ja säädinlaitteiston ominaisuuksista. Varavoimakoneelle kytkeytyvät suuret kuormat ovat järkevää kytkeä portaittain. A-pääkeskuksen suurimpana kuormana on UPS-laitteisto, joka on aseteltu niin, että syöttöverkon taajuuden vaihdellessa normaalia enemmän, se ottaa energiaa akustosta.

A-pääkeskuksen syöttöhäiriön yhteydessä, siirtyy UPS-laitteisto syöttämään kuormaa akustoa hyödyntäen. Asetellun ajan kuluttua varavoimakone käynnistyy ja siirtyy syöttämään A-pääkeskusta saarekeajolla. UPS-laitteiston kuorma ei siirry suoraan varavoimakoneelle, vaan UPS-laitteistossa on asetus, jolla A-pääkeskuksesta otettavaa kuormaa lisätään ramppimaisesti. Ramppi asettelu mahdollistaa varavoimakoneen pehmeämmän tehon nousun, jolloin generaattorin säätäminen on helpompaa ja vältetään suurien kuormien nopeaa siirtymistä generaattorille.

7 Taloudellinen merkitys

Sähkön laadulla on vaikutusta konesalien taloudellisuuteen. Järjestelmän häiriöt voivat aiheuttaa vakavia ongelmia, joiden kustannukset voivat nousta erittäin korkeiksi. Epälineaaristen kuormien vaikutus syöttävään jännitteeseen voi vaikuttaa muiden laitteiden toimintaan, heikentäen tai häiriten niiden toimintaa. Harmoniset yliaaltovirrat aiheuttavat häviöitä johtimissa. Ylimääräiset häviöt johtimissa muuttuvat lämmöksi, joka useimmiten tulee jäädyttää koneellisesti. Häviöt vaikuttavat siten osaltaan konesalin yleiseen hyötysuhteeseen, jota alalla seurataan ja kehitetään aktiivisesti. [13, s. 2.]

Sähköjärjestelmän hyvä sähkön laatu mahdollistaa kuormien moitteettoman ja tehokkaan toiminnan, jolloin laitteiston kustannukset ja hiilijalanjälki on minimaalinen. Huono sähkön laatu altistaa järjestelmään kytketyt kuormat häiriöille, joka voi vaikuttaa niiden elinikään ja toimintaan. Huono sähkön laatu lisää järjestelmän kustannuksia ja siten myös asennetun laitteiston hiilijalanjälkeä. [14, s. 1.]

7.1 Harmoniset virrat

Epälineaariset kuormat tulee huomioida konesalin sähköjärjestelmän komponenttien valinnassa ja mitoituksessa. Yleisimpiä epälineaarisia kuormia konesaleissa ovat nopeus-säädetyt moottorikäytöt, tietotekniikan laitteet ja UPS-järjestelmät. Epälineaarisen kuorman aiheuttamat harmoniset yliaallot voivat aiheuttaa samaan sähkönsyöttöön kytkettyjen komponenttien kuumenemista ja ylimääräisiä häviöitä [9, s.8]. Yleisimpiä yliaaltojen aiheuttamia ongelmia ovat

- kaapelien, moottorien, generaattorien ja muuntajien ylikuumentuminen
- häiriöt näytöissä sekä valonlähteissä
- sähköjärjestelmän mittausrakenteiden väärät mittauslukemat
- suojalaitteiden toimintahäiriöt
- tietotekniikan laitteiden toimintahäiriöt.

Yliaaltojen aiheuttamia haittoja voidaan hallita erilaisilla menetelmillä. Konesalin sisäisessä sähköverkossa voidaan asettaa erilaiset vaatimukset sähkön laadulle, kuin vaikkapa jakeluverkon liityntäpisteessä. Yliaaltoja voimakkaasti aiheuttava kuormitus voidaan rajata jollekin tietylle järjestelmän osalle, jolloin siihen ei liitetä muita laitteita. Rajaamalla ja järjestelemällä erilaiset kuormitukset toisistaan riippumattomiksi, voidaan konesalin sähköjärjestelmässä sallia korkeitakin yliaaltosäröjä, niiden vaikutusten jäädessä kuitenkin rajatuksi. Rajauksella ja järjestelyllä tarkoitetaan esimerkiksi järjestelmää, jossa palvelinkuorma ja yleinen kiinteistön sähkötekniikka ovat eri muuntopiireissä tai palvelinkuormaa syötetään omalla verkollaan. Kuvattu järjestely on yleinen, koska useimmiten konesalien palvelinkuormaa syötetään UPS-järjestelmällä ja yleinen kiinteistön sähkötekniikka syötetään erikseen varmentamattomana. Tällöin IT-laitteiden korkeat yliaaltopitoisuudet eivät aiheuta ongelmia esimerkiksi valaistuksessa tai toisissa muuntopiireissä.

Yliaaltojen aiheuttamia ongelmia voidaan ottaa huomioon laitteiston valintoja tehdessä. Sähköjärjestelmän komponenttien huolellisella valinnalla ja johtojärjestelmien ylimitoituksella on mahdollista päästä hyvään lopputulokseen, jos halutaan järjestelmässä olevan mahdollisimman vähän yliaaltojen aiheuttamia ongelmia tai niiden vaikutuksia halutaan rajata. Suunnittelussa ja valinnassa voidaan ottaa huomioon esimerkiksi seuraavia asioita

- muuntajien ylirajoitus tai K-kerroin muuntajan käyttäminen yliaalto-pitoiselle kuormitukselle
- laitteiden tasasuuntaajien tyypiksi valitaan vähän yliaaltoja muodostava toteutus
- kaapeleiden poikkipinnan ylirajoitus ja verkon impedanssin pienentäminen
- katkaisijoiden ylirajoitus tai soveltuvuuden varmistaminen yliaalto-pitoiselle kuormitukselle.

Muuntajien ylirajoituksen lisäksi voi olla mahdollista käyttää ns. K-kerroin muuntajaa, jonka rakenteessa on huomioitu yliaaltojen aiheuttama lämpeneminen. K-kerroin muuntajan hinta on useimmiten edullisempi, kuin muuntajan ylirajoittaminen. Muuntajaa valitessa, tulee suunnittelussa ottaa huomioon muuntajan ylikuumentumisen välttäminen rajoituskuormalla. Järjestelmän sisältäessä paljon yliaaltoja, tulee muuntajan kuormitusta laskea noin 20–30 prosenttia muuntajan nimelliskuormituksesta tai muuntaja tulee rajoittaa 20–30 prosenttia rajoituskuormaa suuremmaksi. Verrattaessa esimerkiksi 1250 ja 1600 kVA:n normaaleja 20/0,4 kV:n jakelumuuntajien hintoja, on suuremman muuntajan hinta noin kuusi prosenttia korkeampi. [10, s. 3; 3, s. 26; 15, s. 1.]

Tehoelektroniikkaa sisältävien laitteiden, kuten UPS-laitteen tai palvelimen virtalähteen valintaan tulee kiinnittää huomiota. Laitteen suuntaajien rakenne voi olla esimerkiksi ilman kuristinta oleva 6-pulssinen silta tai aktiivinen IGBT-tasasuuntaajasilta. Rakenteiden välinen hintaero pienissä järjestelmissä voi olla 250 prosenttia, jossa jälkimmäinen on kalliimpi ratkaisu. Sähkön laadun erot ovat kuvattujen siltojen välillä kuitenkin merkittäviä ja järkevin ratkaisu saattaa olla parhaan sähkön laadun omaava järjestelmä. Valintaan vaikuttaa järjestelmän teho, pysyvä särö ja syöttävä verkko. [9, s. 26.]

Kaapeleiden ylirajoitus voi tulla kysymykseen, jos esimerkiksi ei tiedetä tarkkaan kytkettävän kuorman laatua. Nollajohtimeen summautuvat yliaallot voivat aiheuttaa johtimen kuumentumista ja siten aiheuttaa ylimääräisiä häviöitä tai jopa paloriskin. Epälineaarista kuormaa sisältävässä verkossa voi nollajohtimessa kulkea jopa 1,7-kertainen yliaaltovirta verrattuna vaihevirtaan. Nollajohtimia ei normaalisti suojata sulakkeilla tai katkaisijoilla, joten ylikuormitus voi aiheuttaa vaaraa. Huolehtimalla kolmivaiheisen kuormituksen symmetrisyydestä eri vaiheiden kesken voidaan pienentää nollajohtimessa kulkevaa virtaa. Verkon impedanssin pienentäminen vähentää harmonisten jänniteyliaaltojen määrää. Verrattaessa esimerkiksi yksijohtimisen 100 metrin mittaisen

kuparivoimakaapelin tukkuhintojen eroa 185 mm²:n ja 240 mm²:n johtimen poikkipinta-alojen välillä, on suurempi poikkipinta-ala noin 25 prosenttia kalliimpi. [3, s. 29; 9, s. 18.]

Yliaaltopitoisen kuorman katkaiseminen voi aiheuttaa ongelmia katkaisijoiden katkaisukyvyssä. Yliaaltojen aiheuttaman virran särön ollessa suuri, voi virran nousunopeus nol-lakohdassa olla suurempi, kuin puhtaan sinimuotoisen virran. Suurempi nousunopeus voi vaikeuttaa katkaisutapahtumaa. Katkaisukyvyyn ollessa heikentynyt, voi yhtenä vaihtoetona olla katkaisijan ylimitoittaminen tai sen tyyppin vaihtaminen soveltuvammaksi. Verrattaessa tukkuhintoja 125 ja 160 ampeerin kolminapaisen kompaktikatkaisijan vä-lillä, on suuremman nimellisvirran omaavan katkaisijan hinta noin 25 prosenttia kalliimpi. [3, s. 28.]

7.2 Johdinhäviöt

Sähköjärjestelmän johtimissa tapahtuvia häviöitä arvioidaan keskittymällä sähkön laa-dun aiheuttamiin häviöihin. Merkittävimpiä sähkön laadusta johtuvien häviöiden aiheut-tajia ovat yliaaltovirrat. Keskuksista saatujen mittaustuloksien perusteella arvot redusoi-daan vastaamaan täyden konesalin mitoituskuormaa. Laskennan jälkeen arvoja verra-taan johtimissa tapahtuviin kokonaishäviöihin, jotta saadaan arvioitua sähkön laadun ai-heuttamien häviöiden osuus kokonaishäviöistä.

Laskelmissa keskitytään voimakaapeleissa tapahtuviin pätötehohäviöihin. Yksittäisissä ryhmäjohtoissa tapahtuvat häviöt jätetään laskelmien ulkopuolelle. Ryhmäjohtoissa kul-kee normaalitilanteessa verrattain pieniä virtoja kaapeleiden poikkipinta-alaan nähden. Tarkoitettuja ryhmäjohtoja ovat esimerkiksi palvelimien syöttöjohdot ja kiinteistön sähkö-tekniikan syöttöpisteet, kuten pistorasiat ja valaistus. Harmonisten yliaaltovirtojen ollessa kohtalaisen pieniä ja keskittyessä lähinnä alemmille nimellistaajuuden monikerroille, ei taajuudesta johtuvaa virranahtoa huomioida laskelmissa. Virranahdossa kaapelin tehollinen poikkipinta-ala pienenee taajuuden noustessa, koska virran tiheys johtimen ulko-reunoilla on keskiosaa suurempi [16, s.6].

Kaapeliyhteydet, joista laskelmat tehdään ovat

- A-muuntajan ja A-pääkeskuksen välinen yhteys
- A-pääkeskuksen ja UPS-järjestelmän väliset yhteydet
- UPS-järjestelmän ja UPS-jakokeskuksen väliset yhteydet
- UPS-jakokeskuksen ja IT-ryhmäkeskuksien väliset yhteydet
- B-muuntajan ja B-pääkeskuksen välinen yhteys
- B-pääkeskuksen ja IV-ryhmäkeskuksien väliset yhteydet.

Luetellut kaapeliyhteydet on toteutettu käyttäen yksijohtimisia kuparivoimakaapeleita. Suurivirtaisten yhteyksien osalta kaapeloinnissa on hyödynnetty rinnakkaisia johtimia. Kaapeleina on käytetty kolmea erilaista poikkipinta-alaa, jotka ovat 300 mm², 240 mm² ja 185 mm². Käytetyt kaapelit ovat IEC 60228-standardin mukaisia. Käytettyjen kaapelityyppien tarkat resistanssit +20 C°:en lämpötilassa ovat lueteltu taulukossa 9.

Taulukko 9. Kaapelityypit, poikkipinta-alat sekä vastusarvot.

Kaapelityyppi	Poikkipinta-ala (mm ²)	Resistanssi (Ω/km)
Kuparivoimakaapeli 1x185	185	0,106
Kuparivoimakaapeli 1x240	240	0,0801
Kuparivoimakaapeli 1x300	300	0,0641

Kaapeliyhteyksien pituudet vaihtelevat noin kymmenen ja sadan metrin välillä. Yhteyksien tarkat mitat ovat tiedossa asennusvaiheen dokumentaatiosta. Lyhyimmät yhteydet ovat muuntajilta pääkeskuksille ja pisimmät ovat UPS-jakokeskukselta IT-ryhmäkeskuksille. Tarkasteltavia kaapeliyhteyksiä on yhteensä 35 kappaletta, joista 16 on nollajohtimia ja loput vaihejohtimia. Johtimella tarkoitetaan kaapeliyhteyttä, riippumatta siitä onko siinä yksittäiset vai rinnakkaiset johtimet vaiheissa ja nolliissa. Rinnakkaisilla johtimilla tarkoitetaan esimerkiksi 3x8x300 kaapelointia, joka tarkoittaa kolmea vaihetta, jossa kussakin kulkee rinnakkain kahdeksan kappaletta 300 mm²:n kaapelia.

Johtimien häviötehot lasketaan, jotta voidaan arvioida niistä aiheutuvia kustannuksia. Johdinhäviöt lisäävät sähkönkulutuksen lisäksi myös tarvetta jäähdytykselle, joten myös tämä otetaan huomioon laskelmissa. Johtimet sijaitsevat pääsääntöisesti tiloissa, joita jäähdytetään aktiivisesti esimerkiksi sähkölaitteiden vuoksi. Tiloissa kulkee kaapelireittejä, joten kaapeleiden häviötehot myös lämmittävät tilaa ja siten lisäävät osaltaan tilan jäähdytystarvetta.

Mitatut vaihekohtaiset virrat muutetaan keskiarvoksi, jota käytetään laskelmissa vaihekohtaisena virtana. Virrat redusoidaan ja johtimien pätötehohäviöt lasketaan redusoidulla virralla, joka kuvastaa täyden konesalin mitoitettua kuormitustasoa. Harmoniset yliaaltovirrat saadaan redusoitua halutulle mitoitustehon virralla kaavalla

$$I_{red.} = \frac{I_{harm.}}{I_{50Hz}} \times I_{mit.}, \quad (3)$$

jossa $I_{harm.}$ tarkoittaa mitattua harmonisten yliaaltojen virtaa, I_{50Hz} nimellistaajuuden mitattua virtaa ja $I_{mit.}$ täyden konesalin kuormitustason virtaa.

Johtimien pätötehohäviöt saadaan laskettua kaavalla

$$P_h = 3I^2R, \quad (4)$$

jossa kolme tarkoittaa vaiheiden määrää, I on redusoitu virta ja R johtimen resistanssi.

Esimerkkinä lasketaan A-muuntajan ja A-pääkeskuksen välisten vaihejohtimien pätötehohäviöt. Redusoitu nimellistaajuuden virta on 1800 ampeeria ja kahdeksan rinnakkaisen 300mm² vaihekohtaisen yksijohdinkaapelin resistanssi on kahdeksan metrin matkalla 0,0654 milliohmia. Redusoitu harmoninen yliaaltovirta on 0,619 ampeeria. Ensimmäisenä lasketaan kokonaishäviöt $P_{h\text{ kok}}$ kaavalla 4

$$3 \times 1800^2 A \times 0,0654 m\Omega = 635,7 W$$

sekä harmonisten yliaaltojen pätötehohäviöiden osuus $P_{h\text{ harm}}$

$$3 \times 0,619^2 A \times 0,0654 m\Omega = 0,2 W$$

Laskelma esimerkistä voidaan todeta, että vaiheiden johdinhäviöt mitoitusvirralla ovat moninkertaiset verrattuna harmonisiin yliaaltovirtoihin.

Taulukkolaskentaohjelmassa tehdyt mitattavan konesalin johtimien häviölaskelmat on kokonaisuudessaan esitetty liitteessä 1. Saaduista mittaustuloksista voidaan havaita, että vaihejohtimista lasketut häviöt ovat enimmäkseen nimellistaajuuden virran

aiheuttamia pätötehohäviöitä $P_{h\text{ kok.}}$. Nollajohtimissa häviöt ovat sen sijaan lähes pelkään harmonisista yliaaltovirroista johtuvia pätötehohäviöitä. Harmonisten yliaaltovirtojen aiheuttamat pätötehohäviöt ovat 415,2 wattia, joka saadaan summaamalla sarakkeen $P_{h\text{ harm.}}$ kaikki arvot. Johtimet ovat käytössä ympäri vuosisesti ja tehon arvioidaan olevan vakio, tällöin vuosikohtaiset yliaaltovirtojen pätötehohäviöt ovat noin 3640 kilowattituntia. Tulos saadaan laskettua kaavalla

$$P_{h\text{ harm.}} = t \times P_h = 8760\text{ h} \times 415,2\text{ W} = 3637,2\text{ kWh} \quad (5)$$

Arvioitaessa sähkön hinnaksi esimerkiksi 0,1 €/kWh ja tämän lisäksi jäähdytyksen kuluiksi 0,005 €/kWh, saadaan vuosikohtaiseksi kustannukseksi 381,9 euroa. Tulos saadaan laskettua kaavalla 5 kertomalla saatu yliaaltojen pätötehohäviö arvioiduilla sähkön hinnoilla

$$3637,2\text{ kWh} \times (0,1 + 0,005\text{ €}) = 381,9\text{ €}$$

Johtimien kokonaishäviöiden summa on noin 9187,6 wattia, joka saadaan summaamalla sarakkeiden $P_{h\text{ kok.}}$ ja $P_{h\text{ harm.}}$ kaikki arvot. Arvioidut yliaaltovirtojen aiheuttamat häviöt ovat noin 4,5 prosenttia johtimien kokonaishäviöistä. Yliaaltojen aiheuttamien häviöiden osuus saadaan laskettua kaavalla 6

$$\frac{P_{h\text{ Harm.}}}{P_{h\text{ Kok.}}} \times 100\% = \frac{415,2\text{ W}}{9187,6\text{ W}} \times 100\% = 4,5\% \quad (6)$$

7.3 Sähköjärjestelmän toimintahäiriöt

Konesalien komponenttien toiminta on riippuvainen syötettävän sähkön laadusta. Jännitetason häiriöiden yhteydessä IT-laitteiden toiminta vaarantuu. Häiriöt laitteiden syöttöjännitteessä voivat johtua useasta eri syystä, joista yleisimpiä ovat

- komponenttiviat
- kuorman äkilliset ja suuret muutokset
- häiriöt syöttävässä jakeluverkossa
- käyttäjien tekemät kytkentävirheet
- suojalaitteen toiminta.

Sähköjärjestelmän toimintahäiriöt voivat vaikuttaa eri laajuudella, jolloin myös taloudelliset vaikutukset ovat erilaisia. Sähkön katkeaminen esimerkiksi yhdestä palvelimesta, ei välttämättä aiheuta yhtä laajoja seuraamuksia, kuin kokonaisen konesalin kattava sähkökatko.

Järjestelmien komponenteissa tapahtuvien vikojen aiheuttamat vaikutukset riippuvat sähköjärjestelmän rakenteesta. Vaikuttavia tekijöitä ovat lisäksi järjestelmän sen hetkinen tilanne. Normaalitylanteessa tutkittavana oleva konesali sietää yksittäisiä konesalin sähköjärjestelmän komponenttivikoja, huoltotilanteen yhteydessä tapahtuvat komponenttiviat voivat sen sijaan aiheuttaa sähkökatkoja konesalin osissa. Usean rinnakkaisen tai peräkkäisen vian yhteydessä on mahdollista, että vaikutukset konesaliin ovat paljon laajemmat.

Kuorman muutokset voivat aiheuttaa jännitetason muutoksia. Järjestelmän komponenttien hetkellinen virranantokyky voi olla kuorman muutokseen nähden rajoitettua ja tämä aiheuttaa jännitetason romahtamista. Konesalin kuormitusmuutokset ovat normaalisti hitaita, ja nopeita kuormitusmuutoksia tapahtuu lähinnä syötönvaihtojen, erilaisten kytkentätilanteiden sekä vikojen yhteydessä. Esimerkkinä tilanne, jossa generaattorin kuormitus muuttuu kytkentätilanteen johdosta 0–100 %:iin, jolloin odottamatta varavoimakoneelta vaaditaan suurempaa momenttia, kuin mihin sen säädin on pyrkinyt. Generaattorin ja sitä pyörittävän voimakoneen kierrosluku ja jännitetaso putoaa, kunnes voimakone ehtii tuottamaan lisää momenttia ja generaattori siten halutun määrän tehoa.

Syöttävän verkon häiriöt voivat vaikuttaa konesalin toimintaan. Esimerkkinä pääkeskuksissa tapahtunut jännitehäiriö 27. syyskuuta 2018, jolloin keskuksien jännitetasot romahtivat ja IT-laitteiden syöttö siirtyi pelkästään UPS-laitteelle. Ilman UPS-laitetta jännitehäiriö olisi vaikuttanut myös IT-laitteiden ryhmäkeskuksiin asti ja vaarantanut IT-laitteiden toiminnan.

Sähköjärjestelmän kytkentöjä tehdään erilaisissa laitteiden huolto- ja erotustilanteissa. Kytkentöjen suunnittelu on tärkeää, ja käyttäjät tulee olla huolellisesti perehdytettyjä tekemään kytkentöjä. Käyttäjien tekemät kytkentävirheet ovat mahdollisia ja niiden seuraukset voivat olla laajoja. Esimerkkinä kytkentätilanne, jossa varavoimakoneen huollon ajaksi generaattorin katkaisija laitetaan käyttäjän toimesta erotusasentoon. Huollon jälkeen katkaisijaa ei muisteta palauttaa toimintavalmiuteen. Jakeluverkon häiriön yhteydessä generaattori ei pysty syöttämään keskusta, koska katkaisija on erotusasennossa.

Laitteiden ja kaapeleiden suojaukseen tarkoitettujen suojalaitteet, kuten sulakkeet ja katkaisijat ovat sähköjärjestelmän tärkeitä komponentteja. Järjestelmässä tapahtuvat häiriöt, kuten jonkin laitteen vikaantuminen ja sen aiheuttama oikosulku, aiheuttavat joissain tilanteissa jännitetasossa suuriakin muutoksia. Esimerkkinä tilanne, jossa konesalia syötetään hetkellisesti UPS-laitteella vain akustoa hyödyntäen ja konesalissa tapahtuu oikosulku, jossa vikavirran suuruus ylittää UPS-laitteen nimellisen virranantokyvyn.

Konesalin sähköjärjestelmän häiriö, jossa kaikki palvelimet lopettavat toimintansa, on vakava ja voi aiheuttaa korkeita kustannuksia. Kustannukset jakaantuvat esimerkiksi alla luetellun mukaisesti

- sähkökatkon syiden selvitys
- sähkökatkon leviämisen estäminen tai rajaaminen
- palautustyöt
- asiakas selvittelyt
- komponenttikulut
- yhtiön työvoiman kulut
- asiakkaiden kulut
- kolmannen osapuolen kulut
- liikevaihdon tappiot sähkökatkon ajalta
- liiketoiminnan häiriöt.

Kulut jakaantuvat kolmeen erilaiseen ryhmään, jotka ovat suorat, välilliset ja mahdollisuuksiin liittyvät kustannukset. [17, s. 5.]

Sähkökatkon syyn selvittelyyn käytetyt resurssit aiheuttavat suoraa kuluja. Sähkökatkon leviämisen estäminen tai rajaaminen vaikuttaa välillisesti lopullisiin kustannuksiin, joten nopea toiminta syyn ja sitä korjaavien toimenpiteiden selvittämiseksi on tärkeää. Sähköjen palauttamisen jälkeen konesalin toimintoja voidaan alkaa käynnistää.

Tietoliikenteen toiminnan palauttamisen jälkeen aiheutuvat kulut ovat esimerkiksi asiakkaiden laitteiden häiriöiden korjausta, kyselyihin vastaamista tai tietoliikenteen uudelleen reitittämistä sähkökatkon jäljiltä.

Konesalissa tapahtuva sähkökatko voi rikkoa herkkiä laitteita tai aiheuttaa niiden toimintaan häiriöitä. Riippuen sähkökatkon syystä myös sähköjärjestelmän komponentteja voidaan joutua vaihtamaan. Esimerkkinä UPS-laitteen vikaantumisen aiheuttama konesalin sähkökatko, jolloin UPS-laitteeseen joudutaan tekemään korjaustyötä ja mahdollisesti vaihtamaan komponentteja.

Sähkökatkon yhteydessä yhtiön henkilöstön tuottavuus voi kärsiä, jos jotakin työtehtävää ei pystytä sähkökatkon aikana tekemään. Esimerkiksi konesalin palvelintoimintaa tukevien henkilöiden työtehtävät eivät ole mahdollisia sähkökatkon yhteydessä.

Asiakkaille aiheutuvat kulut ovat välillisiä ja niiden vaikutus lopullisiin sähkökatkosta aiheutuviin kustannuksiin on tapauskohtaista. Asiakas on esimerkiksi voinut hajauttaa ja varmentaa toimintaansa useisiin eri konesaleihin, joten yksittäisen konesalin toimintahäiriö ei välttämättä vaikuta asiakkaan toimintaan.

Kolmannen osapuolen kulut ovat esimerkiksi vian selvittämiseen ja korjaamiseen käytettäviä resursseja. Konsultointi ja erilaisten asiantuntijoiden kulut kuuluvat kolmannen osapuolen aiheuttamiin kustannuksiin.

Liiketoiminnan estyminen aiheuttaa yrityksen liikevaihtoon tappioita. Yritys ei pysty sähkökatkon aikana tarjoamaan palveluitaan, joten nykyisen liiketoiminnan lisäksi palveluiden tarjoaminen kärsii myös mahdollisille uusille asiakkaille. Liikevaihtoon liittyviä

välillisiä kustannuksia ovat myös yrityksen maineeseen liittyvät taloudelliset haitat. Esimerkkinä ovat menetetyt asiakkuudet ja julkisuudessa käytävän keskustelun aiheuttamat välilliset selvittelyt. [17, s. 3.]

Konesalien mediaanikustannukset sähkökatkon yhteydessä ovat vuonna 2016 olleet noin 580 000 euroa. Kustannuksista noin puolet kuluu välillisiin kuluihin, kolmasosa suoriin kuluihin ja loput mahdollisuuksiin liittyviin kuluihin. Liiketoiminnasta riippuen, suunnittelemtoman sähkökatkon kustannukset voi konesaleissa olla jopa 15 000 euroa minuuttia kohden. Yleisin syy konesalien sähköhäiriöihin on UPS-järjestelmän häiriöt. [17, s. 16.]

8 Yhteenveto

Konesalien sähkön laadulla on taloudellista merkitystä laitteiston toimintaan, elinikään ja suorituskykyyn. Huono sähkön laatu altistaa sähkölaitteita toimintahäiriöille, ylikuumenemiselle ja vaikuttaa konesalin yleiseen hyötysuhteeseen. Sähkön laadun ja toimintavarmuuden parantamiseksi laitteistoa joudutaan varmentamaan ja kuormitusta jakamaan eri syötöille. Sähkön laadun parantaminen kohottaa laitteiston rakennus- ja ylläpitokustannuksia. Laitteiston monimutkaisempi rakenne asettaa korkeammat vaatimukset käyttökäyttäjien ammattitaidolle ja ymmärrykselle erilaisista laitteista.

Sähkölaitteistoon tehtävät investoinnit voidaan suhteuttaa joiltakin osin haluttuun sähkön laatuun ja luotettavuuteen. Laitteiston parempi luotettavuus tarkoittaa yleensä järjestelmien varmentamista. Sähkön laadun parantaminen edellyttää siihen soveltuvien komponenttien ja laitteiden käyttämistä. Molempien ratkaisujen osalta järjestelmään tehtävien investointien määrä kasvaa.

Mittaustulosten perusteella konesalin toimintaan liittyvät laitteet vaikuttavat sähkön laatuun erilaisin tavoin. Nykyaikainen aktiiviseen IGBT-tasasuuntaajaan perustuva UPS-laitte ottaa syöttävästä verkosta lähes sinimuotoista virtaa ja siten häiriöt syöttävään jännitteeseen ovat pienet. Palvelin, jonka virtalähde perustuu yksinkertaiseen tasasuuntaajatekniikkaan, ottaa konesalin sisäisestä verkosta hyvin epälineaarista virtaa ja vaikuttaa heikossa verkossa syöttävään jännitteeseen. Vaikutuksia muihin laitteisiin saadaan

kuitenkin minimoitua rakentamalla syöttävä verkko tarpeeksi jäykäksi, jolloin jännitteen muutokset ovat vähäisempiä. Laitteiden ryhmittely sekä jakaminen eri syöttöihin rajaa huonon sähkön laadun vaikutuksia toisiin laitteisiin.

Konesalissa tapahtuvan sähkökatkoksen aiheuttamat kustannukset voivat nousta erittäin suureksi. Kustannuksien todellista määrää on vaikea arvioida, koska osa kuluista on epäsuoria ja vaikutukset voivat ulottua pitkälle tulevaisuuteen esimerkiksi yrityksen maineen heikentyessä tai asiakkuuksien menetyksinä.

Arvioidut sähkön laadusta johtuvat häviöt voivat vaihdella todellisessa tilanteessa. Laitteiden sähkön laadun mittaukset ovat tehty laitteiden vajaalla kuormitusasteella, ja arvioidut tulokset ovat redusoitu vastaamaan konesalin mitoituskuormaa. Laitteiden sähkön laatu voi todellisuudessa muuttua kuormituksen myötä. Muutosta on vaikea arvioida ilman tarkempia mittauksia erilaisilla tehoilla.

Saadut tiedot konesalin sähkön laadusta ja taloudellisesta merkityksestä auttavat yritystä kehittämään laitteistoja. Tehoanalysointia saatavan tiedon kerääminen ja laitteiden käyttäminen edistää käyttöhenkilöstön tietämystä sähköjärjestelmästä ja sen tilasta. Havaittuja sähkön laadusta johtuvia ongelmia on vähäisesti, koska laitteiston rakennetta on yrityksessä kehitetty useiden vuosien ajan. Konesalien yleinen hyötysuhde on jatkuvan kehittämisen alaisena, ja siten pienienkin häviöiden poistaminen sekä sähköjärjestelmän hyötysuhteen nosto voi vaikuttaa haluttuun lopputulokseen myönteisesti.

Lähteet

- 1 Bollen, Mathias. 2003. What is power quality?. Verkkoaineisto. Science direct. <[https://doi.org/10.1016/S0378-7796\(03\)00067-1](https://doi.org/10.1016/S0378-7796(03)00067-1)>. Luettu 13.4.2019.
- 2 Geng, Hwaiyu. 2014. Data Center Handbook.
- 3 Korpinen, Leena; Mikkola, Marko; Keikko, Tommi; Falck, Emil. 2008. Yliaalto-opas. Verkkoaineisto. Leena Korpinen. <<http://leenakorpinen.com/archive/opukset/ylialto-opus.pdf>>. Luettu 13.4.2019.
- 4 Saini, Manis Kumar; Kapoor, Rajiv. 2012. Classification of power quality events. Verkkoaineisto. Science direct. <<https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2012.04.045>>. Luettu 13.4.2019.
- 5 SFS-EN 50160. Yleisestä jakeluverkosta syötetyn sähkön jänniteominaisuudet. 2010. Sähkötekniikka, yleistä. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto.
- 6 Alanen, Raili; Kätönen, Hannu. 2006. Sähkön laadun ja jakelun luotettavuuden hallinta, State of art-selvitys. Verkkoaineisto. VTT Working Papers 1459-7683. <<https://www.vtt.fi/inf/pdf/workingpapers/2006/w52.pdf>>. Luettu 13.4.2019.
- 7 ITIC CURVE-Power acceptability curve for information technology equipment. 2011. Verkkoaineisto. Power quality world. <www.powerqualityworld.com/2011/04/itic-power-acceptability-curve.html>. Luettu 13.4.2019.
- 8 Power system harmonics, true power factor & DPF measure. 2009. Verkkoaineisto. Power systems. <<https://powersystems.wordpress.com/2009/10/18/power-system-harmonics-true-power-factor-dpf-measure/>>. Luettu 13.4.2019.
- 9 Tekninen opas nro 6, vaihtovirtakäyttöjen yliaalto-opas. 2003. Verkkoaineisto. ABB Technical publication. <<https://search-ext.abb.com/library/Download.aspx?DocumentID=3BFE64440225&LanguageCode=fi&DocumentPartId=1&Action=Launch>>. Luettu 13.4.2019.
- 10 Muuntajien K-kerroin. 2014. Verkkoaineisto. Chauvin-Arnoux. <https://chauvin-arnoux.fi/wp-content/uploads/2014/09/FI_Vad-%C3%A4r-k-faktor.pdf>. Luettu 13.4.2019.
- 11 Mokhtari, H; Dewan S. B.; Iravani, M. R. 2002. Analysis of a static transfer switch with respect to transfer time, in IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 17, no. 1, p. 190-199. Verkkoaineisto. IEEE Explore digital library. <[doi:10.1109/61.974207](https://doi.org/10.1109/61.974207)>. Luettu 13.4.2019.

- 12 Onko mittarilukema luotettava? Why true RMS?. 2017. Verkkoaineisto. Fluke. <http://kesko-onninen-pim-resources-production.s3-website-eu-west-1.amazonaws.com/pimdocuments/TRMS_Onko_mittarilukema_luotettava.pdf>. Luettu 13.4.2019.
- 13 Lembke, Pam; McCluer, Stephen. 2013. Data center power system harmonics: an overview of effects on data center efficiency and reliability. Verkkoaineisto. The Green Grid. <https://3dfs.com/wp-content/uploads/2015/11/WP55_DataCenterPowerSystemHarmonics.pdf>. Luettu 13.4.2019.
- 14 Schipman, Kurt; Delincé, Francois. 2010. The importance of good power quality. Verkkoaineisto. ABB Power Quality Products, Belgium. <<https://search-ext.abb.com/library/Download.aspx?DocumentID=9AKK105152A6069&LanguageCode=en&DocumentPartId=&Action=Launch>>. Luettu 13.4.2019.
- 15 Verkkokomponentit ja yksikköhinnat 2016-2023. Helsinki: Energiavirasto.
- 16 Korpinen, Leena. Sähkövoimatekniikkaopas, osa 8. Sähkömagnetismi. 1998. Verkkoaineisto. Leena Korpinen. <http://www.leenakorpinen.fi/archive/svt_opus/8sahkomagnetismi.pdf>. Luettu 13.4.2019.
- 17 Cost of data center outages. 2016. Verkkoaineisto. Ponemon Institute. <<https://www.ponemon.org/library/2016-cost-of-data-center-outages>>. Luettu 13.4.2019.

Johtimien häviölaskenta

Tulokset johtimien häviölaskennoista taulukkolaskentaohjelmasta.

Rivi	Mistä	Mihin	Pituus (m)	Rin. lkm.	Vaihe / nolla lkm.	Poikkipinta-ala (mm ²)	Resistanssi (G)	I avg (A)	I avg - 150Hz (A)	Virta red. (A)	P _n kok. arvioitu (W)	P _n harm. arvioitu (W)	Huom.
1	A-muuntaja	A-keskus	8	8	8	3	300	0.0000654	958.0	0.3	1800	635.7	0.22 Vaiheet
2	A-muuntaja	A-keskus	8	8	1	300	0.0000654	76.3	57.1	150	1.5	1.1	Nollajohdin
3	A-pääkeskus	UPS-laite 1	10	3	3	300	0.0002180	379.0	0.8	600	235.4	0.5	Ei nollajohdinta
4	A-pääkeskus	UPS-laite 2	10	3	3	300	0.0002180	379.0	0.8	600	235.4	0.5	Ei nollajohdinta
5	A-pääkeskus	UPS-laite 3	10	3	3	300	0.0002180	379.0	0.8	600	235.4	0.5	Ei nollajohdinta
6	UPS-laite 1	UPS-jakokeskus	12	3	3	300	0.0002616	393.8	2.9	600	282.5	2.1	Vaiheet
7	UPS-laite 1	UPS-jakokeskus	12	3	1	300	0.0002616	137.0	104.1	227	13.5	10.2	Nollajohdin
8	UPS-laite 2	UPS-jakokeskus	12	3	3	300	0.0002616	393.8	2.9	600	282.5	2.1	Vaiheet
9	UPS-laite 2	UPS-jakokeskus	12	3	1	300	0.0002616	137.0	104.1	227	13.5	10.2	Nollajohdin
10	UPS-laite 3	UPS-jakokeskus	12	3	3	300	0.0002616	393.8	2.9	600	282.5	2.1	Vaiheet
11	UPS-laite 3	UPS-jakokeskus	12	3	1	300	0.0002616	137.0	104.1	227	13.5	10.2	Nollajohdin
12	UPS-jakokeskus	IT-ryhmäkeskus 1	21	1	3	240	0.0015834	65.5	0.1	280	372.4	0.5	Vaiheet
13	UPS-jakokeskus	IT-ryhmäkeskus 1	21	1	1	240	0.0015834	12.8	2.6	118	22.0	4.5	Nollajohdin
14	UPS-jakokeskus	IT-ryhmäkeskus 2	37	1	3	240	0.0027898	65.5	0.1	200	334.8	0.5	Vaiheet
15	UPS-jakokeskus	IT-ryhmäkeskus 2	37	1	1	240	0.0027898	12.8	2.6	39	4.2	0.9	Nollajohdin
16	UPS-jakokeskus	IT-ryhmäkeskus 3	50	1	3	240	0.0037700	275.6	3.2	200	462.4	5.3	Vaiheet
17	UPS-jakokeskus	IT-ryhmäkeskus 3	50	1	1	240	0.0037700	117.0	106.8	39	5.7	5.2	Nollajohdin
18	UPS-jakokeskus	IT-ryhmäkeskus 4	57	1	3	240	0.0042978	275.6	3.2	280	1010.8	11.7	Vaiheet
19	UPS-jakokeskus	IT-ryhmäkeskus 4	57	1	1	240	0.0042978	117.0	106.8	118	59.8	54.6	Nollajohdin
20	UPS-jakokeskus	IT-ryhmäkeskus 5	74	1	3	240	0.0055796	275.6	3.2	280	1312.3	15.2	Vaiheet
21	UPS-jakokeskus	IT-ryhmäkeskus 5	74	1	1	240	0.0055796	117.0	106.8	118	77.7	70.9	Nollajohdin
22	UPS-jakokeskus	IT-ryhmäkeskus 6	79	1	3	240	0.0059566	275.6	3.2	280	1401.0	16.3	Vaiheet
23	UPS-jakokeskus	IT-ryhmäkeskus 6	79	1	1	240	0.0059566	117.0	106.8	118	82.9	75.7	Nollajohdin
24	UPS-jakokeskus	IT-ryhmäkeskus 7	96	1	3	240	0.0072384	275.6	3.2	280	1702.5	19.8	Vaiheet
25	UPS-jakokeskus	IT-ryhmäkeskus 7	96	1	1	240	0.0072384	117.0	106.8	118	100.8	92.0	Nollajohdin
26	B-muuntaja	B-pääkeskus	8	8	8	3	300	0.0000654	67.7	2.5	150	4.4	0.2 Vaiheet
27	B-muuntaja	B-pääkeskus	8	8	1	300	0.0000654	19.0	0.7	45	0.1	0.0	Nolla
28	B-pääkeskus	IV-ryhmäkeskus 1	25	1	3	185	0.0024775	7.6	1.3	20	3.0	0.5	Vaiheet
29	B-pääkeskus	IV-ryhmäkeskus 1	25	1	3	185	0.0024775	0.8	0.0	2	0.0	0.0	Nollajohdin
30	B-pääkeskus	IV-ryhmäkeskus 2	25	1	3	185	0.0024775	7.6	1.3	20	3.0	0.5	Vaiheet
31	B-pääkeskus	IV-ryhmäkeskus 2	25	1	3	185	0.0024775	0.8	0.0	2	0.0	0.0	Nollajohdin
32	B-pääkeskus	IV-ryhmäkeskus 3	25	1	3	185	0.0024775	7.6	1.3	20	3.0	0.5	Vaiheet
33	B-pääkeskus	IV-ryhmäkeskus 3	25	1	3	185	0.0024775	0.8	0.0	2	0.0	0.0	Nollajohdin
34	B-pääkeskus	IV-ryhmäkeskus 4	25	1	3	185	0.0024775	7.6	1.3	20	3.0	0.5	Vaiheet
35	B-pääkeskus	IV-ryhmäkeskus 4	25	1	3	185	0.0024775	0.8	0.0	2	0.0	0.0	Nollajohdin
Yhteensä:												415.2	
											9187.6		

Jännitehäiriö A-päikeskuksessa

27.9.2018 A-päikeskuksessa tapahtuneen jännitehäiriön vaikutus keskuksen virtaan.

